



# Étude multi-échelle des variations structurales, géochimiques et des propriétés magnétiques des coulées basaltiques prismées : exemple de la coulée de La Palisse (Ardèche) et de Saint-Arcons-d'Allier (Haute-Loire)

Tiphaine Boiron

## ► To cite this version:

Tiphaine Boiron. Étude multi-échelle des variations structurales, géochimiques et des propriétés magnétiques des coulées basaltiques prismées : exemple de la coulée de La Palisse (Ardèche) et de Saint-Arcons-d'Allier (Haute-Loire). Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2011. Français. NNT : 2011EMSE0622 . tel-00676504

**HAL Id: tel-00676504**

**<https://theses.hal.science/tel-00676504>**

Submitted on 5 Mar 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

NNT : 2011 EMSE 0622

## THÈSE

présentée par

Tiphaine Boiron

pour obtenir le grade de  
Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Spécialité : Sciences de la terre

Étude multi-échelle des variations structurales, géochimiques et des propriétés magnétiques des coulées basaltiques prismées : exemple de la coulée de La Palisse (Ardèche) et de Saint-Arcons-d'Allier (Haute-Loire)

soutenue à Saint Etienne, le 12 octobre 2011

### Membres du jury

Président :	Alain GOURGAUD	Professeur émérite, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand
Rapporteurs :	Bernard HENRY Erwan HALLOT	Chargé de recherche CNRS, IPGP, Paris Maître de conférences, Université Rennes 1, Rennes
Examineur(s) :	Pascal RICHET	Directeur de recherche, IPGP, Paris
Directeur(s) de thèse :	Bernard GUY Jérôme BASCOU (encadrant) Marie-Christine GERBE (encadrant)	Directeur de recherche, ENSMSE, Saint Etienne Maître de conférences, Université Jean Monnet, Saint Etienne Maître de conférences, Université Jean Monnet, Saint Etienne

**Spécialités doctorales :**

SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX  
 MECANIQUE ET INGENIERIE  
 GENIE DES PROCEDES  
 SCIENCES DE LA TERRE  
 SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT  
 MATHEMATIQUES APPLIQUEES  
 INFORMATIQUE  
 IMAGE, VISION, SIGNAL  
 GENIE INDUSTRIEL  
 MICROELECTRONIQUE

**Responsables :**

J. DRIVER Directeur de recherche – Centre SMS  
 D. DELAFOSSE Professeur – Centre SMS  
 G. THOMAS Professeur – Centre SPIN  
 B. GUY Maître de recherche – Centre SPIN  
 J. BOURGOIS Professeur – Centre SITE  
 E. TOUBOUL Ingénieur – Centre G2I  
 O. BOISSIER Professeur – Centre G2I  
 JC. PINOLI Professeur – Centre CIS  
 P. BURLAT Professeur – Centre G2I  
 Ph. COLLOT Professeur – Centre CMP

**Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)**

AVRIL	Stéphane	MA	Mécanique & Ingénierie	CIS
BATTON-HUBERT	Mireille	MA	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BENABEN	Patrick	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CMP
BERNACHE-ASSOLLANT	Didier	PR 0	Génie des Procédés	CIS
BIGOT	Jean-Pierre	MR	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaïd	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BOISSIER	Olivier	PR 1	Informatique	G2I
BORBELY		MR	Sciences et Génie des Matériaux	SMS
BOUCHER	Andras	MA	Génie Industriel	G2I
BOUDAREL	Xavier	PR 2	Génie Industriel	DF
BOURGOIS	Marie-Reine	PR 0	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BRODHAG	Jacques	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BURLAT	Christian	PR 2	Génie industriel	G2I
COLLOT	Patrick	PR 1	Microélectronique	CMP
COURNIL	Philippe	PR 0	Génie des Procédés	SPIN
DAUZERE-PERES	Michel	PR 1	Génie industriel	CMP
DARRIEULAT	Stéphane	IGM	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DECHOMETS	Michel	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
DESRAYAUD	Roland	MA	Mécanique & Ingénierie	SMS
DELAFOSSE	Christophe	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DOLGUI	David	PR 1	Génie Industriel	G2I
DRAPIER	Alexandre	PR 2	Mécanique & Ingénierie	SMS
DRIVER	Sylvain	DR 0	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
	Julian			
FEILLET		PR 2	Génie Industriel	CMP
FOREST	Dominique	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CIS
FORMISYN	Bernard	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
FRACZKIEWICZ	Pascal	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GARCIA	Anna	MR	Génie des Procédés	SPIN
GIRARDOT	Daniel	MR	Informatique	G2I
GOEURLOT	Jean-Jacques	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GRAILLOT	Dominique	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
GROSSEAU	Didier	MR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Philippe	MR	Génie des Procédés	SPIN
GUY	Frédéric	DR	Sciences de la Terre	SPIN
GUYONNET	Bernard	DR	Génie des Procédés	SPIN
HERRI	René	PR 2	Génie des Procédés	SPIN
	Jean-Michel			
INAL		PR 2	Microélectronique	CMP
KLÖCKER	Karim	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
LAFOREST	Helmut	CR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
	Valérie			
LERICHE		CR CNRS	Mécanique et Ingénierie	SMS
LI	Rodolphe	EC (CCI MP)	Microélectronique	CMP
MALLIARAS	Jean-Michel	PR 1		
MOLIMARD	George Grégory	MA	Microélectronique	CMP
MONTHEILLET	Jérôme	DR 1 CNRS	Mécanique et Ingénierie	SMS
PERIER-CAMBY	Frank	PR 2	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
PIJOLAT	Laurent	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Christophe	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Michèle	PR 0	Génie des Procédés	SPIN
STOLARZ	Jean-Charles	CR	Image, Vision, Signal	CIS
SZAFNICKI	Jacques	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS

THOMAS	Konrad Gérard	PR 0	Sciences & Génie de l'Environnement Génie des Procédés	SITE SPIN
TRIA				
VALDIVIESO	Assia	MA	Microélectronique	CMP
VAUTRIN	François	PR 0	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
VIRICELLE	Alain	MR	Mécanique & Ingénierie	SMS
WOLSKI	Jean-Paul	DR	Génie des procédés	SPIN
XIE	Krzysztof Xiaolan	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux Génie industriel	SMS CIS

## Glossaire :

PR 0	Professeur classe exceptionnelle
PR 1	Professeur 1 <sup>ère</sup> classe
PR 2	Professeur 2 <sup>ème</sup> classe
MA(MDC)	Maître assistant
DR	Directeur de recherche
Ing.	Ingénieur
MR(DR2)	Maître de recherche
CR	Chargé de recherche
EC	Enseignant-chercheur
IGM	Ingénieur général des mines

## Centres :

SMS	Sciences des Matériaux et des Structures
SPIN	Sciences des Processus Industriels et Naturels
SITE	Sciences Information et Technologies pour l'Environnement
G2I	Génie Industriel et Informatique
CMP	Centre de Microélectronique de Provence
CIS	Centre Ingénierie et Santé

Dernière mise à jour le : 13 septembre 2010





# Remerciements

Ce travail est issu de nombreuses collaborations : tout d'abord celle de Bernard Guy de l'École des mines, mon directeur de thèse, et de Jérôme Bascou et Marie-Christine Gerbe de l'Université Jean Monnet, mes co-encadrants. Cette collaboration initiale a permis de mettre en place un sujet original avec l'utilisation de plusieurs disciplines. Je tiens donc à remercier Bernard Guy pour avoir proposé ce sujet sur la prismation des laves basaltiques, qui aujourd'hui suscite à nouveau beaucoup d'intérêt. Je remercie également Jérôme Bascou pour avoir apporté l'aspect structural et les propriétés magnétiques dans ce travail. Il a eu la patience de m'initier aux différentes méthodes d'analyse ainsi qu'à l'interprétation des résultats. Je remercie bien sûr Marie-Christine Gerbe pour tout l'aspect géochimique de ce travail. Nous avons passé ensemble beaucoup de temps à faire les manip notamment pour les isotopes stables, ainsi que sur l'interprétation des résultats de géochimie. Enfin, je les remercie tous les trois pour leur soutien tout au long de cette thèse.

Je remercie Bernard Henry de l'IPG Paris et Erwan Hallot du Laboratoire Géosciences de Rennes d'avoir accepté de rapporter ce manuscrit et je les remercie également pour leurs conseils. Je remercie également Alain Gourgaud du laboratoire Magmas et Volcans de Clermont-Ferrand et Pascal Richet de l'IPG Paris d'avoir accepté de faire partie du jury.

Bien sûr, d'autres collaborations se sont effectuées au cours de la thèse. Je remercie ainsi Pierre Camps qui m'a accueilli au Laboratoire Géosciences à Montpellier pour effectuer une bonne partie des mesures d'ASM et de courbes thermomagnétiques et qui a effectué par la suite des mesures d'ARM. Je remercie également Eric Ferré de l'Université de Carbondale (South Illinois) qui a effectué toutes les mesures d'hystérésis et de FORC et avec qui j'ai beaucoup échangé pendant la thèse. Je remercie également Patrick Launeau qui m'a accueilli au Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes pour réaliser l'analyse d'image sur le microscope à platine tournante et me permettre de comprendre le fonctionnement de ses logiciels de traitement d'image.

Je remercie également Pierre Boivin du Laboratoire Magmas et Volcans de Clermont-Ferrand pour nous avoir fait découvrir plusieurs terrains dans le Massif Central susceptibles de nous intéresser. Je remercie Casimir Cortial de l'association des géologues de la Haute-Loire pour sa participation active lors de ces sorties de terrain et pour nous avoir à plusieurs reprises accompagné sur le terrain pour l'échantillonnage.

Il faut également que je remercie tout le personnel technique avec qui j'ai pu travailler et qui a contribué aux nombreuses données de cette thèse. Je remercie donc Frédéric Gallice de l'École des mines pour les données de géochimie des majeurs, traces et REE, Chantal Perrache pour les solutions aqueuses qui ont servi pour les analyses des REE et pour avoir eu la patience de m'apprendre à les faire, ainsi que Colette Alboussière pour les nombreuses lames minces. Je remercie également Paul Jouffrey, Sergio Sao-Joao et Claire Maurice pour m'avoir aidé lors de l'acquisition des données EBSD. Merci également au personnel administratif et en particulier Joëlle Verney, secrétaire à l'École des mines, qui m'a beaucoup soutenue et aidée dans toutes mes démarches. Je remercie aussi Marc Doumas pour les nombreuses recherches bibliographiques et l'impression des manuscrits qu'il a effectuées pour moi.

Merci également à toutes les personnes avec qui j'ai pu échanger, je pense notamment à Daniel Garcia, Jacques Moutte et Jean-Luc Bourchardon, chercheurs à l'École des mines. Je pense également aux chercheurs de l'équipe Transfert Lithosphérique à l'Université Jean Monnet.

Je tiens à remercier tous mes collègues doctorants que j'ai pu croiser pendant ma thèse. Je pense en particulier à Carole Obeidy, Raquel Tavares, Iolanda Albuquerque, Frédéric Bard, Damien Rembelski, Jinane Tarabay et tant d'autres de l'École des mines, ainsi qu'Antoine Bénard et Luc-Serge Doucet de l'Université Jean Monnet.

Enfin je tiens tout particulièrement à remercier celui qui partage ma vie depuis de nombreuses années maintenant, Guilhem Hoareau, et qui a énormément contribué à ce travail par ses nombreuses relectures du manuscrit, corrections de l'orthographe et autres suggestions. Sans son soutien ce travail n'aurait jamais pu aboutir.

# Table des matières

REMERCIEMENT .....	I
<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>III</b>
<b>TABLE DES FIGURES ET TABLEAUX.....</b>	<b>VII</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1. ÉTAT DE L'ART .....</b>	<b>5</b>
INTRODUCTION .....	6
1. HISTORIQUE DES ETUDES MENEES SUR LA PRISMATION DANS LES ROCHES MAGMATIQUES.....	6
1.1. Du 17 <sup>ème</sup> au 19 <sup>ème</sup> siècle.....	6
1.2. A partir du 20 <sup>ème</sup> siècle .....	12
2. LES DIFFERENTES HYPOTHESES ET APPROCHES DE LA PRISMATION.....	14
2.1. Théorie de la contraction thermique.....	15
2.1.1. Description des stries et propagation des fractures.....	15
2.1.2. Les modèles thermodynamiques .....	15
2.1.3. Expériences analogiques .....	16
2.2. Théorie de la conduction-convection.....	16
2.3. Théorie de la digitation par la double diffusion .....	18
2.4. Théorie de la digitation par la surfusion de constitution.....	18
3. LES ETUDES MAGNETIQUES ET GEOCHIMIQUES DE LA PRISMATION DES LAVES .....	19
3.1. Les études magnétiques.....	21
3.1.1. Les études à l'échelle du prisme.....	21
3.1.2. A l'échelle de la coulée.....	23
3.2. Les études géochimiques.....	23
3.2.1. A l'échelle du prisme .....	23
3.2.1. A l'échelle de la coulée : .....	23
3.2.2. A l'échelle de la coulée : .....	24
CONCLUSION .....	25
<b>CHAPITRE 2. CONTEXTE GEOLOGIQUE DES SITES D'ETUDE .....</b>	<b>27</b>
INTRODUCTION .....	28
1. CONTEXTE GEOLOGIQUE DES COULEES DE LA PALISSE ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER.....	28
1.1. Généralités sur le volcanisme du Velay .....	28
1.2. Le volcanisme du bas Vivarais .....	31
1.3. Le volcanisme du Haut-Allier.....	34
2. ÉTUDES DE TERRAIN SUR LA COULEE DE LA PALISSE (ARDECHE) .....	36
2.1. Description de la coulée de La Palisse .....	36
2.2. Site d'échantillonnage du barrage de la Palisse (site 1) .....	38
2.3. Site d'échantillonnage « La Palisse village » (site 2) .....	43
3. ÉTUDES DE TERRAIN SUR LA COULEE DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER (HAUTE-LOIRE).....	47
3.1. Localisation de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier .....	47
3.1. Les affleurements au niveau de la carrière. ....	48
3.2. Les prismes dans la carrière. ....	52
CONCLUSION : .....	53
<b>CHAPITRE 3. CARACTERISATION PETROGRAPHIQUE, TEXTURALE ET GEOCHIMIQUE DES LAVES DE LA PALISSE ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. ....</b>	<b>55</b>
INTRODUCTION : .....	56
1. ÉTUDE PETROGRAPHIQUE ET MINERALOGIQUE .....	56
1.1. Analyse pétrographique et composition modale par analyse d'image.....	56

1.2.	Mesure des orientations préférentielles de réseau (OPR) .....	58
1.3.	La coulée de La Palisse .....	60
1.4.	La coulée de Saint-Arcons-d'Allier .....	63
2.	ÉTUDE GEOCHIMIQUE .....	65
2.1.	Composition en éléments majeurs .....	65
2.2.	Composition en éléments en traces et en terres rares .....	69
2.2.1.	Diagrammes de Harker .....	69
2.2.1.	Les spectres de terres rares.....	69
2.2.2.	Les spectres de terres rares.....	71
2.1.	Composition en éléments majeurs des minéraux.....	73
2.1.	Étude isotopique des laves à l'échelle de la coulée .....	80
	CONCLUSION : .....	85
<b>CHAPITRE 4. ÉTUDES MAGNETIQUES ET CRISTALLOGRAPHIQUES DE LA COULEE DE LA PALISSE .....</b>		<b>87</b>
	INTRODUCTION : .....	88
1.	INTRODUCTION:.....	91
2.	GEOLOGICAL SETTINGS AND PETROLOGY .....	93
3.	METHODS .....	94
4.	MAGNETIC MINERALOGY .....	95
5.	ANISOTROPY OF MAGNETIC SUSCEPTIBILITY (AMS).....	96
6.	MAGNETIC AND CRYSTALLOGRAPHIC FABRICS .....	98
7.	DISCUSSION .....	99
8.	CONCLUSIONS .....	102
<b>CHAPITRE 5. ÉTUDES PETROGRAPHIQUES, TEXTURALES, GEOCHIMIQUES ET STRUCTURALES A L'ECHELLE DU PRISME 127</b>		
	INTRODUCTION .....	128
	PARTIE I : ÉTUDES PETROLOGIQUES ET GEOCHIMIQUES.....	128
1.	VARIATION PETROGRAPHIQUE .....	128
1.1.	Prismes de la coulée de La Palisse.....	128
1.2.	Prismes de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier.....	129
2.	ANALYSE TEXTURALE A L'ECHELLE DU PRISME (LA PALISSE) .....	132
3.	PROFILS DE COMPOSITION CHIMIQUE A L'ECHELLE DU PRISME (MAJEURS, TRACES, REE ET ISOTOPES, COMPOSITION DES MINERAUX) .....	133
3.1.	Variations des éléments majeurs sur roche totale .....	133
3.2.	Variation en éléments traces et terres rares sur roche totale.....	136
3.2.1.	Variations des éléments en traces .....	136
3.2.2.	Spectres de terres rares .....	138
3.3.	Variations en éléments majeurs dans les minéraux (analyses in-situ) .....	140
3.4.	Variations des isotopes stables de l'hydrogène et de l'oxygène .....	145
	PARTIE II : ÉTUDES PETROPHYSIQUES.....	150
1.	VARIATION MAGNETIQUE : ASM ET PROPRIETES D'HYSTERESIS .....	150
1.1.	Variation des paramètres et des fabriques d'anisotropie de susceptibilité magnétique .....	150
1.1.1.	Le prisme de La Palisse .....	150
1.1.2.	Le prisme de Saint-Arcons-d'Allier .....	152
1.2.	Variations des paramètres d'hystérésis .....	159
1.2.1.	Le prisme de La Palisse .....	160
1.2.2.	Le prisme de Saint-Arcons-d'Allier .....	161
1.3.	Variations de l'anisotropie de susceptibilité magnétique et des paramètres d'hystérésis à l'échelle d'un prisme dans sa section longitudinale .....	164
2.	DISCUSSION .....	166

CONCLUSIONS .....	169
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>171</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>177</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>A-1</b>
<b>ANNEXE I : PROPRIETES MAGNETIQUES.....</b>	<b>A-3</b>
<b>ANNEXE II : ANALYSES GEOCHIMIQUES SUR ROCHE TOTALE.....</b>	<b>A-7</b>
<b>ANNEXE III : COMPOSITIONS EN ELEMENTS MAJEURS DES MINERAUX PAR MICROSONDE ELECTRONIQUE.....</b>	<b>A-15</b>
<b>ANNEXE IV : DONNEES MAGNETIQUES.....</b>	<b>A-43</b>
<b>ANNEXE V : FORCE DE FABRIQUE DES PLAGIOCLASES ET CLINOPYROXENES.....</b>	<b>A-59</b>
<b>ANNEXE VI : ORIENTATIONS DES AXES DE SUSCEPTIBILITE MAGNETIQUE DU PRISME DE LA PALISSE .....</b>	<b>A-63</b>

# Table des figures et tableaux



## Figures :

FIGURE 1-1: PREMIERE REPRESENTATION DE LA CHAUSSEE DES GEANTS EN IRLANDE DU NORD REALISEE PAR CHRISTOPHER COLE ET PUBLIEE PAR FOLEY EN 1694. ....	7
FIGURE 1-2: REPRESENTATION DE LA CHAUSSEE DES GEANTS PAR SANDYS, 1697. ....	7
FIGURE 1-3: REPRESENTATION DE LA CHAUSSEE DES GEANTS PAR DRURY, 1740. ....	8
FIGURE 1-4: CARTE DE LA TOUR D'AUVERGNE PAR NICOLAS DESMAREST, 1771. LES LIEUX DE FORMATION DE COLONNES BASALTIQUES (REGROUPEMENT DE CERCLES) SONT REPRESENTES PAR DES GROUPEMENTS DE CERCLES AINSI QUE LEUR ORIGINE LE « PUY VOLCANIQUE » A DROITE DE L'IMAGE. ....	8
FIGURE 1-5: SCHEMA DE LA SUCCESSION DES DIFFERENTES COULEES DE LA CHAUSSEE DES GEANTS, TOMKEIEFF, 1940. ....	9
FIGURE 1-6 : REPRESENTATION DE COLONNES DE BASALTE D'APRES KONRAD GESNER, 1565. ....	10
FIGURE 1-7: ILLUSTRATION DE LA FORMATION DES PRISMES (MALLET, 1875). LE PLAN SS CORRESPOND AU SOMMET DES PRISMES ET LA SURFACE A PARTIR DE LAQUELLE LA MASSE DE BASALTE COMMENCE A SE SUBDIVISER. LES POINTS B CORRESPONDENT AUX POINTS LES PLUS BAS A PARTIR DESQUELS SE DEVELOPPENT LES FRACTURES AU COURS D'UN REFROIDISSEMENT PLUS AVANCE. AB EST LA DISTANCE DE PART ET D'AUTRE D'UN PRISME, A ET B REPRESENTENT LES CENTRES DES PRISMES. LES COURBES CORRESPONDENT AUX ISOTHERMES (LES PLUS FROIDES A L'EXTERIEUR DU PRISME ET LES PLUS CHAUDES VERS L'AXE DU PRISME). ....	12
FIGURE 1-8: ILLUSTRATION DES STRIES SUR LES FRACTURES DANS DES LAVES. (A) DEMARCATION DES STRIES SUR UNE COLONNE (GOEHRING, 2008). (B) SCHEMA D'UNE SECTION DE PRISME (D'APRES GROSSENbacher, 1995). LES STRIES SONT MONTREES SUR L'UNE DES FACES DU PRISME. F= LARGEUR D'UNE FACE DU PRISME, D= DIAMETRE DE LA COLONNE, W = LARGEUR D'UNE STRIE. LES ZONES EN GRIS CLAIR REPRESENTENT DES ZONES TENDRES OU LA PROPAGATION DES FRACTURES EST RAPIDE. LES ZONES EN GRIS FONCE REPRESENTENT DES ZONES PLUS DURES OU LA PROPAGATION DES FRACTURES EST PLUS LENTE. ....	16
FIGURE 1-9: ILLUSTRATION DE LA PERTE DE CHALEUR PAR CONDUCTION ASSOCIEE A LA CONVECTION D'EAU ENTRE LES COLONNES (RYAN ET SAMMIS, 1981). ....	17
FIGURE 1-10: THEORIE DE LA DIGITATION (D'APRES GUY ET LE COZE (1990)). (A) DIAGRAMME TEMPERATURE (T) EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN SOLUTE (C). L EST LE DOMAINE LIQUIDE ET S LE DOMAINE SOLIDE, LES COURBES REPRESENTENT LE LIQUIDUS ET LE SOLIDUS, Cs ET CL LES CONCENTRATIONS DU SOLIDE ET DU LIQUIDE A UNE TEMPERATURE DONNEE. (B) DIAGRAMME DE LA CONCENTRATION EN SOLUTE EN FONCTION DE LA DISTANCE ENTRE LE SOLIDE ET LE LIQUIDE. (C) DIAGRAMME TEMPERATURE EN FONCTION DE LA DISTANCE ENTRE LE SOLIDE ET LE LIQUIDE. LES SEGMENTS AB ET BC SONT LES PROFILS DE TEMPERATURE IMPOSES PAR LES CONDITIONS AUX LIMITES ET LA DIFFUSION THERMIQUE. LE SEGMENT BD DONNE LA TEMPERATURE DU LIQUIDE QUI CORRESPOND A LA COMPOSITION DU LIQUIDE, VARIABLE DANS L'ESPACE A CAUSE DU REJET DE SOLUTE. LE DOMAINE HACHURE REPRESENT LA SURFUSION. (D) INSTABILITE DE L'INTERFACE DU FRONT DE SOLIDIFICATION AVEC X PARALLELE A CE FRONT ET Y PERPENDICULAIRE. (P) EST LE PLAN MOYEN, F UNE IRREGULARITE A UN INSTANT $T_1$ ET (s) LIMITE DU PLAN DE L'IRREGULARITE A UN INSTANT $T_2$ . ....	20
FIGURE 1-11: PHOTOS DE PRISMES (GUY, 2010). (A) DISTRIBUTION DE VESICULES PARALLELE AUX BORDS DU PRISME. (B) STRUCTURE RADIAIRE PARTANT DU CENTRE DU PRISME VERS LES BORDS. ....	20
FIGURE 1-12: ETUDE D'UNE SECTION DE PRISME PAR ELLWOOD ET FISK (1977). LES SEGMENTS AB ET DC SONT LES TRAVERSEES SUR LESQUELLES ONT ETE ANALYSEES LES TERRES RARES. LES ZONES GRISEES REPRESENTENT LES CONCENTRATIONS MAXIMALES EN SM. ....	24
FIGURE 2-1 : CARTE DE LOCALISATION DES GRANDS ENSEMBLES VOLCANIQUES DU VELAY (MODIFIE D'APRES MERGOIL & BOIVIN 1993) ....	30
FIGURE 2-2 : PLACE DES EVENEMENTS VOLCANIQUES REMARQUABLES DU VELAY AU CENOZOÏQUE (MERGOIL & BOIVIN 1993).....	32
FIGURE 2-3 : CARTE SCHEMATIQUE DU VOLCANISME RECENT DU BAS VIVARAIS MODIFIEE D'APRES GUERIN ET GILLOT, 2007. ....	33
FIGURE 2-4 : SCHEMA DU PLATEAU DU DEVES D'APRES BOIVIN, 1982. ....	36
FIGURE 2-5 : CARTE GEOLOGIQUE DE LA COULEE DE LA PALISSE MODIFIEE D'APRES BAMBIER ET AL., 1985. ....	38
FIGURE 2-6 : LOCALISATION DE LA 1 <sup>ERE</sup> SERIE D'ECHANTILLONNAGE, SITE DE LA PALISSE- BARRAGE. ....	39
FIGURE 2-7 : LOCALISATION DE LA 2 <sup>EME</sup> SERIE D'ECHANTILLONNAGE, SITE DE LA PALISSE- BARRAGE.....	40
FIGURE 2-8 : « CHAUSSEE DES GEANTS », SECTION DES PRISMES ISSUS DE LA COLONNADE, LA PALISSE BARRAGE. ....	41
FIGURE 2-9 : SECTION DE PRISME DE LA COLONNADE AVEC OBSERVATION D'UNE STRUCTURE RADIAIRE, LA PALISSE BARRAGE. ....	41
FIGURE 2-10 : STRUCTURES CONCENTRIQUES OBSERVEES DANS L'ENTABLEMENT, LA PALISSE BARRAGE. ....	42

FIGURE 2-11 : LA PALISSE BARRAGE, PRISMES LE LONG DE LA RIVIERE EN DIRECTION DU BARRAGE (LOCALISATION GPS N°3). .....	42
FIGURE 2-12 : PASSAGE ENTRE LA COLONNADE ET L'ENTABLEMENT DE LA COULEE DE LA PALISSE, SITE DU BARRAGE. ....	43
FIGURE 2-13 : PSEUDO-COLONNADE DE LA COULEE DE LA PALISSE, LA PALISSE VILLAGE. ....	44
FIGURE 2-14 : AFFLEUREMENT AU BORD DE LA RIVIERE AVEC OBSERVATION DE LA ZONE A DEBIT PLANAIRE, LA PALISSE VILLAGE. L'ENTABLEMENT TEL QU'IL EST DECRIS POUR LE SITE DE LA PALISSE BARRAGE EST EGALEMENT OBSERVE DANS LE PROLONGEMENT DE CET AFFLEUREMENT. ....	44
FIGURE 2-15 : ZONE A DEBIT PLANAIRE EN BORDURE DE LA LOIRE, LA PALISSE VILLAGE .....	45
FIGURE 2-16: PASSAGE LATERAL ENTRE ENTABLEMENT ET ZONE A DEBIT PLANAIRE, LA PALISSE VILLAGE .....	45
FIGURE 2-17: AFFLEUREMENT LE LONG DE LA LOIRE, OU L'ENTABLEMENT SE SITUE AU-DESSUS DE LA ZONE A DEBIT PLANAIRE AVEC A LA BASE UNE COLONNADE PEU DEVELOPPEE, LA PALISSE VILLAGE. ....	46
FIGURE 2-18: OBSERVATION DE STRIES SUR LES FACES DES PRISMES QUI CONSTITUENT LA COLONNADE SUR LE SITE DE LA PALISSE VILLAGE. ....	46
FIGURE 2-19: PRISMES DE DIAMETRE DE 20 CM INCLINES VERS LA RIVIERE DU SITE DE LA PALISSE VILLAGE. ....	47
FIGURE 2-20: CARTE GEOLOGIQUE DU SECTEUR DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER (MARCHAND ET AL. 1989). ....	49
FIGURE 2-21: BASE DE LA COULEE 1 DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER, AU BORD DE LA ROUTE D48. ....	50
FIGURE 2-22: CONTACT ENTRE LES DIFFERENTES COULEES DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. ....	50
FIGURE 2-23: AFFLEUREMENT DE LA COULEE DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER AU BORD DE LA COUTE D48. LE CONTACT ENTRE LA COLONNADE ET L'ENTABLEMENT EST NET. ....	51
FIGURE 2-24: SITE D'ECHANTILLONNAGE DES COLONNES ISSUES DE LA COULEE DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER, A PROXIMITE DE LA CARRIERE. LE CONTACT NET ENTRE LA COLONNADE ET L'ENTABLEMENT SI RETROUVE SUR CET AFFLEUREMENT. ....	51
FIGURE 2-25: SECTION DE PRISME ISOLE AVEC CERCLE INSCRIT .....	52
FIGURE 2-26: PRISMES ISOLEES ISSUES DE LA CARRIERE DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER .....	53
FIGURE 3- 1 : (A) PHOTO AU MICROSCOPE OPTIQUE EN LUMIERE REFLECHIE. LES GRAINS BLANCS SONT LES OXYDES. (B) SEUILLAGE EFFECTUE AVEC LE LOGICIEL IMAGE J PERMETTANT DE NE FAIRE RESSORTIR QUE LES GRAINS D'OXYDES. ....	57
FIGURE 3- 2 : IMAGES TRAITEES AVEC LE LOGICIEL <i>IMAGE2003</i> . (A) IMAGE CONTENANT LE MAXIMUM DE MINERAUX ALLUMES, OBTENUE PAR LA COMBINAISON DE 6 PHOTOS A DIFFERENTS ANGLES DE ROTATION DES POLARISEURS. (B) TRAITEMENT DE L'IMAGE (A) OU LES PLAGIOCLASES SONT MIS EN AVANT CORRESPONDANT AUX GRAINS LES PLUS BLANCS ET DE PETITE TAILLE. (C) ROSE DE DIRECTION DE L'ORIENTATION PREFERENTIELLE DE FORME ISSUE DU LOGICIEL <i>INTERCEPTS</i> DE PATRICK LAUNEAU (LAUNEAU & ROBIN 1996). LES AXES DE COULEUR ROSE CORRESPONDENT AUX AXES LONG ET COURT DE LA FABRIQUE DE FORME, L'AXE VERTICAL CORRESPOND A L'ORIENTATION DE LA LAME MINCE AVEC X POSITIONNE EN BAS DE L'IMAGE. ....	58
FIGURE 3- 3 : DISPOSITION DANS LE MEB DES ELEMENTS PRINCIPAUX D'UN SYSTEME EBSD AVEC UN FAISCEAU ELECTRONIQUE FOCALISE, UN ECHANTILLON INCLINE A 70°, UN DETECTEUR LATERAL (SCHWARTZ & KUMAR 2009). ....	59
FIGURE 3- 4 : ORIENTATION PREFERENTIELLE DE RESEAU DES PLAGIOCLASES DE L'ECHANTILLON 08tb22b OBTENUE PAR EBSD, PROJETEE DANS UN STEREOGRAMME EN HEMISPHERE INFERIEUR ET AIRE EGALE. N EST LE NOMBRE DE GRAINS ANALYSES, MD CORRESPOND AU MAXIMUM DE DENSITE ET BA LE « BEST AXIS » (EIGENVECTOR), J EST LA FORCE DE FABRIQUE CALCULE POUR LE PLAGIOCLASE. ....	60
FIGURE 3- 5 : OBSERVATION AU MICROSCOPE OPTIQUE DE LAMES MINCES DES DIFFERENTS NIVEAUX DE LA COULEE DE LA PALISSE. LES PHOTOS DE LA COLONNE DE GAUCHE SONT PRISES EN LPNA, LES PHOTOS DE LA COLONNE DE DROITE (CADRE BLANC SUR LES PHOTOS DE GAUCHE) SONT PRISES EN LR. OL : OLIVINE, CPX : CLINOPYROXENE, PL : PLAGIOCLASE, MAG : MAGNETITE ET Vs : VESICULE. LA COMPOSITION MODALE EST ESTIMEE A PARTIR DE L'ANALYSE D'IMAGE OBTENUE GRACE AU LOGICIEL <i>IMAGE J</i> . ....	62
FIGURE 3- 6 : SCHEMA DE LA COLONNADE ET DE L'ENTABLEMENT DE LA COULEE DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER AVEC LA DISPOSITION DU PRISME DANS LA COLONNADE ET LA POSITION DES ECHANTILLONS ISSUS DE LA COLONNADE AU CONTACT DE L'ENTABLEMENT. LES CERCLES CORRESPONDENT AUX CAROTTAGES EFFECTUES LE LONG DU PRISME ET DANS LA COLONNADE AU CONTACT DE L'ENTABLEMENT. ....	63
FIGURE 3- 7 : OBSERVATION AU MICROSCOPE OPTIQUE EN LPNA (A GAUCHE) ET EN LR (A DROITE) DES LAMES MINCES ISSUES DE DIFFERENTS NIVEAU DU PRISME DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. OL : OLIVINE, Cpx : CLINOPYROXENE, PL : PLAGIOCLASE, MAG : MAGNETITE. LA COMPOSITION MODALE EST ESTIMEE A PARTIR DE L'ANALYSE D'IMAGE OBTENUE GRACE AU LOGICIEL <i>IMAGE J</i> ....	64
FIGURE 3- 8 : DIAGRAMME ALCALINS-SILICE (TAS) DES ECHANTILLONS DE LA PALISSE (CARRES ROUGES) ET DE SAINT-ARCONS- D'ALLIER (CARRES BLEUS) SELON LA CLASSIFICATION INTERNATIONALE (LEBAS ET AL. 1986). LA LIGNE LIMITANT LE DOMAINE DES LAVES ALCALINES DU DOMAINE DES LAVES SUBALCALINES EST CELLE DONNEE PAR MACDONALD ET KATSURA (1964). LES	

CHAMPS DELIMITES PAR LES POINTILLES REPRESENTENT DES DONNEES DE LA LITTERATURE SUR DES BASALTES ALCALINS ET BASANITES DU MASSIF CENTRAL. (LIOTARD ET AL. 1983; 1988; BOURDIER & CANTAGREL 1983; CHAUVEL & JAHN 1984; DAUTRIA ET AL. 2004; PASTRE ET AL. 2004) .....	66
FIGURE 3- 9 : DIAGRAMMES DE LA COMPOSITION EN ELEMENTS MAJEURS $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{TiO}_2$ , $\text{K}_2\text{O}$ ET $\text{P}_2\text{O}_5$ NORMALISEES A 100 EN FONCTION DE $\text{MgO}$ , DES ECHANTILLONS ISSUS DES DIFFERENTS NIVEAUX DES COULEES DE LA PALISSE (ROUGE) ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER (BLEU). .....	68
FIGURE 3- 10 : DIAGRAMMES DE BOWEN DES ELEMENTS $\text{TiO}_2$ , $\text{CaO}$ , $\text{K}_2\text{O}$ ET $\text{P}_2\text{O}_5$ DES ECHANTILLONS ISSUS DES DIFFERENTS NIVEAUX DE LA COULEE DE LA PALISSE. LA GAMME DE COMPOSITION CHIMIQUE DE LA COLONNADE CORRESPOND A LA ZONE BLEUE, CELLE DE L'ENTABLEMENT A LA ZONE VERTE, CELLE DE LA ZONE A DEBIT PLANAIRE A LA ZONE ROUGE ET CELLE DE LA PSEUDO-COLONNADE A LA ZONE JAUNE. ....	70
FIGURE 3- 11 : DIAGRAMMES DES ELEMENTS TRACES $\text{Ni}$ , $\text{Sr}$ ET $\text{Ba}$ ET DU RAPPORT $\text{Ti/V}$ EN FONCTION DE $\text{MgO}$ DES ECHANTILLONS ISSUS DES DIFFERENTS NIVEAUX DES COULEES DE LA PALISSE ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. ....	71
FIGURE 3- 12 : SPECTRES DES TERRES RARES NORMALISEES AUX CHONDRITES DES DONNEES DE LA LITTERATURE EN GRIS (VOIR TEXTE), DES ECHANTILLONS DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER (BLEU) ET DE LA PALISSE (ROUGE). ....	72
FIGURE 3- 13 : SPECTRES DES TERRES RARES NORMALISES AUX CHONDRITES DES ECHANTILLONS ISSUS (A) DE LA COULEE DE LA PALISSE, AVEC L'ORIGINE DES ECHANTILLONS PRECISEE DANS LA LEGENDE ; ET (B) DE LA COULEE DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER, AVEC LES ECHANTILLONS DE LA BASE VERS LE SOMMET DE LA COLONNE INDiques DE BAS EN HAUT DE LA LEGENDE. ....	74
FIGURE 3- 14 : COMPOSITIONS CHIMIQUES DES CLINOPYROXENES DES ECHANTILLONS ISSUS DE LA COULEE DE LA PALISSE (ROUGE) ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER (BLEU), OBTENUES PAR MICROSONDE ELECTRONIQUE. (A) NOMENCLATURE UTILISEE POUR DECRIRE CES DONNEES (MORIMOTO, 1988). LES DIAGRAMMES TERNAIRES PRESENTES EN (B) ET (C) SONT INDiques EN GRISE. (B) DIAGRAMME TERNAIRE $\text{Wo-En-Fs}$ DES ECHANTILLONS DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. LA ZONE REPRESENTANT LES ECHANTILLONS ISSUS DE LA BASE DU PRISME EST EN MAUVE, CELLE CORRESPONDANT AU SOMMET DU PRISME EST EN ORANGE. (C) DIAGRAMME TERNAIRE $\text{Wo-En-Fs}$ DES ECHANTILLONS DE LA PALISSE. LA ZONE EN BLEU CORRESPOND AUX ECHANTILLONS DE LA COLONNADE, CELLE EN VERT A L'ENTABLEMENT, CELLE EN ROUGE A LA ZONE A DEBIT PLANAIRE ET CELLE EN JAUNE A LA PSEUDO-COLONNADE. ....	76
FIGURE 3- 15 : COMPOSITIONS CHIMIQUES DES PLAGIOCLASES DES ECHANTILLONS ISSUS DE LA COULEE DE LA PALISSE (ROUGE) ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER (BLEU) OBTENUES PAR MICROSONDE ELECTRONIQUE. (A) NOMENCLATURE UTILISEE POUR DECRIRE CES DONNEES (SMITH & BROWN, 1988). LES DIAGRAMMES TERNAIRES PRESENTES EN (B) ET (C) SONT INDiques EN GRISE. (B) DIAGRAMME TERNAIRE $\text{An-Ab-Or}$ DES ECHANTILLONS DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. LA ZONE REPRESENTANT LES ECHANTILLONS ISSUS DE LA BASE DU PRISME EST EN MAUVE, CELLE CORRESPONDANT AU SOMMET DU PRISME EST EN ORANGE. (C) DIAGRAMME TERNAIRE $\text{An-Ab-Or}$ DES ECHANTILLONS DE LA PALISSE LA ZONE EN BLEU CORRESPOND AUX ECHANTILLONS DE LA COLONNADE, CELLE EN VERT A L'ENTABLEMENT, CELLE EN ROUGE A LA ZONE A DEBIT PLANAIRE ET CELLE EN JAUNE A LA PSEUDO-COLONNADE. ....	78
FIGURE 3- 16 : DIAGRAMMES DES COMPOSITIONS DES OLIVINES EN PROPORTION $\text{Fo}$ ET NOMBRE DE CATION SUR LA BASE DE 4 OXYGENES, (A) DIAGRAMME DES ECHANTILLONS DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER, LA ZONE MAUVE CORRESPONDANT AUX ECHANTILLONS DE LA BASE DU PRISME ET LA ZONE ORANGE A CEUX DU SOMMET. (C) DIAGRAMME DES ECHANTILLONS DE LA PALISSE, LA ZONE BLEUE CORRESPONDANT AUX ECHANTILLONS DE LA COLONNADE, LA VERTE A CEUX DE L'ENTABLEMENT, LA ROUGE A CEUX DE LA ZONE A DEBIT PLANAIRE ET LA JAUNE A LA PSEUDO-COLONNADE. C ET B CORRESPONDENT AUX ANALYSES AU CŒUR ET BORD DES OLIVINES. ....	79
FIGURE 3- 17 : DIAGRAMMES TERNAIRES $\text{TiO}_2\text{-FeO-Fe}_2\text{O}_3$ . (A) CLASSIFICATION DES OXYDES $\text{Fe-Ti}$ MONTRANT LES SOLUTIONS SOLIDES MAGNETITE-ULVŒSPINELLE, HEMATITE – ILMENITE (CLARK, 1997). LES DIAGRAMMES TERNAIRES PRESENTES EN (B) ET (C) SONT INDiques EN GRISE. (B) DIAGRAMME TERNAIRE DES OXYDES DES ECHANTILLONS DE LA COULEE DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. LA ZONE REPRESENTANT LES ECHANTILLONS ISSUS DE LA BASE DU PRISME EST EN MAUVE, CELLE CORRESPONDANT AU SOMMET DU PRISME EST EN ORANGE. (C) DIAGRAMME TERNAIRE CORRESPONDANT AUX ECHANTILLONS DES DIFFERENTS NIVEAUX DE LA COULEE DE LA PALISSE. LA ZONE EN BLEU CORRESPOND AUX ECHANTILLONS DE LA COLONNADE, CELLE EN VERT A L'ENTABLEMENT, CELLE EN ROUGE A LA ZONE A DEBIT PLANAIRE ET CELLE EN JAUNE A LA PSEUDO-COLONNADE. ....	81
FIGURE 3- 18 : DONNEES ISSUS DE L'EXTRACTION DE L'HYDROGENE ET DE L'OXYGENE DES ECHANTILLONS DES DIFFERENTS NIVEAUX DE LA COULEE DE LA PALISSE ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. (A) POURCENTAGE D'EAU DANS L'ECHANTILLON EN FONCTION DE $\Delta\text{D}$ , (B) POURCENTAGE D'EAU DANS L'ECHANTILLON EN FONCTION DE $\Delta^{18}\text{O}$ . ....	83

FIGURE 3- 19 : DONNEES ISOTOPIQUES DE L'HYDROGENE ET DE L'OXYGENE DES DIFFERENTS NIVEAUX DES COULEES DE LA PALISSE ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. (A) $\Delta D$ EN FONCTION DE $\Delta 18O$ AVEC LES VALEURS CORRESPONDANTES AUX EAUX MAGMATIQUES PRIMAIRES (SHEPPARD ET AL., 1969), EAUX METEORIQUES, SMOW ET A LA LIGNE DES KAOLINITES (SAVIN AND EPSTEIN, 1970). .....	84
FIGURE 4- 1 : LOCATION OF THE LA PALISSE BASALT FLOW. (A) LOCATION OF THE BAS-VIVARAIS VOLCANIC REGION. BLACK AREA REFERS TO THE VOLCANIC PROVINCES OF THE FRENCH MASSIF CENTRAL, (B) GEOLOGICAL MAP OF THE STUDIED AREA. BLACK ARROWS INDICATE THE FLOW DIRECTION. ....	113
FIGURE 4- 2 : OUTCROP OF SITE 2. THE VARIOUS LEVELS OF THE FLOW ARE INDICATED. ....	113
FIGURE 4- 3 : REFLECTED LIGHT PHOTOMICROGRAPH OF REPRESENTATIVE THIN SECTION FROM THE COLONNADE OF THE LA PALISSE BASALT FLOW (08TB14B SAMPLE). THE WHITE SPOTS ARE MAINLY CONSTITUTED OF TITANOMAGNETITE GRAINS (Ti-Mt). PL = PLAGIOCLASE, PX = PYROXENE, OL = OLIVINE. ....	114
FIGURE 4- 4 : HIGH TEMPERATURE THERMOMAGNETIC CURVES OF REPRESENTATIVE SAMPLES FROM THE DIFFERENT LEVELS OF THE LA PALISSE BASALT FOR SITE 1 AND 2. THE THERMOMAGNETIC CURVES ARE COMMONLY REVERSIBLE AND INDICATE A CURIE TEMPERATURE ( $T_c$ ) OF ABOUT $110^\circ C$ ASSOCIATED TO THE Ti-RICH TITANOMAGNETITE GRAINS. ....	115
FIGURE 4- 5 : MRS/Ms RATIO VERSUS Hcr/Hc RATIO DIAGRAMS OF SAMPLES FROM THE DIFFERENT LEVELS OF SITE 1 (LP SITE 1) AND SITE 2 (LP SITE 2). THE LIMITS OF THE PSEUDO-SINGLE DOMAIN ARE $0.02 < MRS/Mr < 0.5$ , WITH MULTI DOMAIN $MRS/Mr < 0.02$ AND SINGLE DOMAIN $MRS/Mr > 0.5$ (DUNLOP, 2002). TITANOMAGNETITE EXPERIMENTAL DATA ARE REPORTED (DAY ET AL., 1977). THE TITANOMAGNETITE GRAINS BELONG TO THE PSEUDO-SINGLE DOMAIN (PSD) AND ARE CONSISTENT WITH DATA, ALSO REPORTED, FROM NATURAL TITANOMAGNETITES (O'DONOVAN ET AL., 1986; HARTSTRA ET AL., 1982). ....	116
FIGURE 4- 6 : FORCS DIAGRAMS FROM SITE 1 COLONNADE (SAMPLES 08TB12 AND 08TB18) AND FROM SITE 2 LAYERED ZONE (SAMPLES 08TB59 AND 08TB68). THESE DIAGRAMS ARE CHARACTERISTIC OF PSEUDO-SINGLE DOMAIN GRAINS. ....	117
FIGURE 4- 7 : DIAGRAMS REPRESENTING THE ANISOTROPY PARAMETER $P'$ VERSUS THE BULK MAGNETIC SUSCEPTIBILITY $K_M$ FOR THE DIFFERENT LEVELS OF SITE 1 (A) AND SITE 2 (C). DIAGRAMS OF $P'$ VERSUS THE SHAPE PARAMETER $T$ ARE SHOWN IN (B) AND (D) FOR SITE 1 AND SITE 2, RESPECTIVELY. ....	118
FIGURE 4- 8 : EQUAL AREA PROJECTION IN THE LOWER HEMISPHERE OF THE PRINCIPAL MAGNETIC SUSCEPTIBILITIES AXES ( $K_1$ , $K_2$ , $K_3$ ) MEASURED IN SPECIMENS FROM THE DIFFERENT LEVELS OF THE LA PALISSE FLOW FOR SITES 1 AND 2. THE FLOW DIRECTION INFERRED FROM FIELD OBSERVATIONS IS SHOWN BY THE BLACK ARROW AND THE FLOW DIRECTION DETERMINED FROM AMS STUDY IS SHOWN BY THE WHITE ARROW. THE CONFIDENCE ELLIPSES ARE COMPUTED FROM JELINEK'S STATISTICS (JELINEK, 1978). $N$ = NUMBER OF MEASUREMENTS. FOR SITE 2, THE LAYERED FLOW PLANE IS ALSO PRESENTED IN FULL LINE FOR LAYERED ZONE AND IN DASHED LINE FOR COLONNADE AND PSEUDO-COLONNADE. ....	119
FIGURE 4- 9 : LATTICE PREFERRED ORIENTATION (LPO) OF PLAGIOCLASE, CLINOPYROXENE AND TITANOMAGNETITE OF SAMPLES FROM THE DIFFERENT LEVELS OF THE LA PALISSE FLOW: (A) FROM THE COLONNADE AND THE ENTABLATURE OF SITE 1, (B) FROM THE COLONNADE AND THE LAYERED ZONE OF SITE 2 AND (C) FROM THE PSEUDO-COLONNADE OF SITE 2. EQUAL AREA, LOWER HEMISPHERE PROJECTION IN THE SPECIMEN COORDINATES SYSTEM WITH THE FIELD MEASURED SAMPLE ANGLES $X$ (THE AZIMUTH) AND $Z$ (THE PLUNGE). CONTOURS ARE IN MULTIPLES OF UNIFORM DISTRIBUTION (MUD). MD IS THE MAXIMUM OF DENSITY, BA IS THE BEST AXIS, J IS THE TEXTURE INDEX AND $N$ THE NUMBER OF MEASUREMENTS. (D) REPRESENTATIVE HABITUS OF PLAGIOCLASE, CLINOPYROXENE AND TITANOMAGNETITE SINGLE CRYSTALS. ....	120
FIGURE 4- 10 : PROJECTION IN THE SPECIMEN REFERENTIAL (AS FIGURE 9) OF MAXIMUM OF DENSITY (MD) AND "BEST AXIS" (EIGENVECTOR) OF PLAGIOCLASE LPO FOR SAMPLES FROM THE DIFFERENT FLOW LEVELS. DENSITY MAXIMUM OF [111]-AXES OF TITANOMAGNETITE AND MEAN EIGENVECTORS $K_1$ , $K_2$ AND $K_3$ ARE PLOTTED. ....	123
FIGURE 4- 11 : PROJECTION OF PLAGIOCLASE LPO (MAXIMUM OF DENSITY (MD) AND "BEST AXIS") AND AMS FABRICS (A) AND SHAPE PREFERRED ORIENTATION OF PLAGIOCLASE FROM ROSE OF DIRECTION REPRESENTATION COMPUTED USING THE INTERCEPTS METHOD OF LAUNEAU (LAUNEAU AND ROBIN, 1996) FROM DIGITIZED THIN SECTION IMAGES (B) FOR SAMPLE 08TB14B (SITE 1, COLONNADE). STEREOGRAMS AND ROSES OF DIRECTION ARE IN THE SPECIMEN REFERENTIAL. ....	124
FIGURE 4- 12 : PRINCIPAL DIRECTIONS OF THE AMS AND AMR FABRICS FOR SAMPLES FROM LAYERED ZONE AND COLONNADE OF THE SITE 2 FLOW IN THE EQUAL-AREA, LOWER-HEMISPHERE PROJECTIONS IN GEOGRAPHIC COORDINATE SYSTEM. THE BLACK AND WHITE SYMBOLS ARE AMS AND AMR PRINCIPAL DIRECTIONS, RESPECTIVELY. ....	125
FIGURE 5- 1 : PRISME ISSU DE LA COLONNADE DE LA COULEE DE LA PALISSE (SITE 1) (A) VUE DE COTE ET (B) VUE DE DESSUS, AVEC LES CAROTTAGES DES BORDS DU PRISME VERS LE CENTRE. LES NUMEROS DES ECHANTILLONS SONT INDIQUEES. ....	128

FIGURE 5- 2 : MICROPHOTOGRAPHIES D'ÉCHANTILLONS DU BORD ET DU CENTRE DU PRISME, AU MICROSCOPE OPTIQUE EN LUMIÈRE POLARISÉE NON ANALYSÉE À GAUCHE ET EN LUMIÈRE RÉFLÉCHIE À DROITE. LES ENCADRES BLANCS DE LA PHOTO DE GAUCHE CORRESPONDENT À LA ZONE PHOTOGRAPHIÉE EN LUMIÈRE RÉFLÉCHIE. ....	129
FIGURE 5- 3 : PHOTOS DES SECTIONS DE PRISMES ISSUS DE LA COULÉE DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. (A) PRISME STA-F AVEC LES CAROTTAGES STA-F1 ET STA-F2 INDICQUÉS, A ET B CORRESPONDANTS AUX SPECIMENS DÉCOUPÉS DES CAROTTES AVEC A AU BORD DU PRISME ET B VERS LE CENTRE. (B) CAROTTAGES STA-4-5 ET STA-4-6 EFFECTUÉS À LA BASE DU PRISME, DANS LA SECTION TRANSVERSALE. (C) SECTION DE PRISME STA-B ISSUS DE LA CARRIÈRE DE SAINT ARCONS D'ALLIER ; LA POSITION DES LAMES MINCES STA-B3A ET STA-B2 EST INDICQUÉE. (D) SECTION DE PRISME STA-G ISSUS DE LA CARRIÈRE DE SAINT ARCONS D'ALLIER AVEC LA LOCALISATION DES ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS POUR L'ANALYSE DES RAPPORTS ISOTOPIQUES DE L'HYDROGÈNE (NUMÉROS DE 1 À 10). ....	130
FIGURE 5- 4 : PHOTOS DES LAMES MINCES STA-B3A (BORD DU PRISME) ET STA-B2 (CENTRE DU PRISME) AU MICROSCOPE OPTIQUE EN LUMIÈRE POLARISÉE NON ANALYSÉE (À GAUCHE) ET EN LUMIÈRE RÉFLÉCHIE (À DROITE), ISSUES DU PRISME STA-B PROVENANT DE LA COULÉE DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. ....	131
FIGURE 5- 5 : PHOTO DE LA LAME STA-B1 AVEC LA REPRÉSENTATION DES TROIS ZONATIONS CORRESPONDANT AUX ZONES 1, 2 ET 3 (NUMÉROTATION DU BORD AU CENTRE DU PRISME) ET MICROPHOTOGRAPHIES EN LUMIÈRE RÉFLÉCHIE À PLUS FORT GROSSISSEMENT DE CHACUNE DE CES ZONES. ....	132
FIGURE 5- 6 : ORIENTATIONS PRÉFÉRENTIELLES DE RÉSEAU OBTENUES PAR EBSD DU PLAGIOCLASE, DU CLINOPYROXÈNE ET DE LA TITANOMAGNETITE DES ÉCHANTILLONS 07TB02 ET 07TB05, RESPECTIVEMENT ISSUS DU BORD ET DU CENTRE D'UN PRISME DE LA COULÉE DE LA PALISSE. PROJECTIONS DANS L'HÉMISPHÈRE INFÉRIEURE ET EN AIRES ÉGALES. N EST LE NOMBRE DE MESURES ET J INDIQUE LA FORCE DE FABRIQUE. DES ROTATIONS AUX OPR ONT ÉTÉ EFFECTUÉS AFIN DE PRÉSENTER LES FIGURES DE POLE AVEC COMME RÉFÉRENTIEL LE NORD GÉOGRAPHIQUE (N) POUR LES DEUX ÉCHANTILLONS. ....	134
FIGURE 5- 7 : DIAGRAMMES DES ÉLÉMENTS MAJEURS EN POIDS % EN FONCTION DE MgO POIDS % DES ÉCHANTILLONS ISSUS DU BORD VERS LE CENTRE DU PRISME DE LA COULÉE DE LA PALISSE (EN ROUGE) ; ET DU BORD ET DU CENTRE DU PRISME STA-F DE LA COULÉE DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER (BLEU). ....	136
FIGURE 5- 8 : DIAGRAMMES DES COMPOSITIONS EN ÉLÉMENTS EN TRACES (PPM) EN FONCTION DU MgO (% POIDS) DES ÉCHANTILLONS DU BORD ET DU CENTRE DU PRISME DE LA COULÉE DE LA PALISSE ET DU PRISME STA-F DE LA COULÉE DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. ....	137
FIGURE 5- 9 : SPECTRES DE TERRES RARES NORMALISÉS AUX CHONDRITES (MCDONOUGH & SUN 1995) DES ÉCHANTILLONS ISSUS DU PRISME DE LA COULÉE DE LA PALISSE (A) ET DES ÉCHANTILLONS ISSUS DES PRISMES STA-F ET DE LA BASE DE LA COLONNE DE LA COULÉE DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER (B). ....	139
FIGURE 5- 10 : COMPOSITIONS CHIMIQUES DES CLINOPYROXÈNES DES ÉCHANTILLONS ISSUS DES PRISMES DE LA PALISSE ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER OBTENUES PAR MICROSONDE ÉLECTRONIQUE. (A) NOMENCLATURE UTILISÉE POUR DÉCRIRE CES DONNÉES (MORIMOTO, 1988). LES DIAGRAMMES TERNAIRES PRÉSENTES EN (B) ET (C) SONT INDICQUÉS EN GRIS. (B) DIAGRAMME TERNAIRE Wo-En-Fs DES CLINOPYROXÈNES DU BORD ET DU CENTRE DU PRISME DE LA PALISSE (C) DIAGRAMME TERNAIRE Wo-En-Fs DES CLINOPYROXÈNES DU BORD ET DU CENTRE DU PRISME STA-F, ET DES ZONES 1,2 ET 3 DE L'ÉCHANTILLON STA-B1 DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. ....	142
FIGURE 5- 11 : COMPOSITIONS CHIMIQUES DES PLAGIOCLASES DES ÉCHANTILLONS ISSUS DES PRISMES DE LA PALISSE ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER OBTENUES PAR MICROSONDE ÉLECTRONIQUE. (A) NOMENCLATURE UTILISÉE POUR DÉCRIRE CES DONNÉES (SMITH & BROWN, 1988). LES DIAGRAMMES TERNAIRES PRÉSENTES EN (B) ET (C) SONT INDICQUÉS EN GRIS. (B) DIAGRAMME TERNAIRE An-Ab-Or DES PLAGIOCLASES DU PRISME DE LA PALISSE. (C) DIAGRAMME TERNAIRE An-Ab-Or DES PLAGIOCLASES ISSUS DU BORD ET DU CENTRE DU PRISME STA-F, ET DES 3 ZONES DE L'ÉCHANTILLON STA-B1 DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. ....	143
FIGURE 5- 12 : DIAGRAMMES TERNAIRES TiO <sub>2</sub> -FeO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . (A) CLASSIFICATION DES OXYDES Fe-Ti MONTRANT LES SOLUTIONS SOLIDES MAGNETITE - ULVÖSPINELLE, HEMATITE - ILMENITE (CLARK, 1997). LES DIAGRAMMES TERNAIRES PRÉSENTES EN (B) ET (C) SONT INDICQUÉS EN GRIS. (B) DIAGRAMME TERNAIRE CORRESPONDANT AUX OXYDES DU BORD ET DU CENTRE DU PRISME DE LA PALISSE. (C) DIAGRAMME TERNAIRE DES OXYDES DU BORD ET DU CENTRE DU PRISME STA-F ET DES 3 ZONES DE L'ÉCHANTILLON STA-B1 DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. ....	145
FIGURE 5- 13 : DONNÉES ISSUES DE L'EXTRACTION DE L'HYDROGÈNE ET DE L'OXYGÈNE DES ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS DANS LES PRISMES DE LA PALISSE ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER STA-G ET STA-F. (A) POURCENTAGE D'EAU DANS L'ÉCHANTILLON EN FONCTION DE ΔD, (B) POURCENTAGE D'EAU DANS L'ÉCHANTILLON EN FONCTION DE Δ <sup>18</sup> O. ....	147

FIGURE 5- 14 : DONNEES ISOTOPIQUES DE L'HYDROGENE ET DE L'OXYGENE DES PRISMES DE LA PALISSE ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER (STA-F ET STA-G). (A) $\Delta D$ EN FONCTION DE $\Delta 18O$ AVEC LES VALEURS CORRESPONDANTES AUX EAUX MAGMATIQUES PRIMAIRES (SHEPPARD ET AL., 1969), EAUX METEORIQUES, SMOW ET A LA LIGNE DES KAOLINITES (SAVIN AND EPSTEIN, 1970). .....	148
FIGURE 5- 15 : PHOTOS DES PRISMES ISSUS DE (A) LA COULEE DE LA PALISSE ET (B) LA COULEE DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. LE QUADRILLAGE REPRESENT LES CUBES DE 2CMX2CM DECOUPES POUR LES MESURES D'ASM. ....	150
FIGURE 5- 16 : COURBES DE SUSCEPTIBILITE MAGNETIQUE NORMALISEES A $K_0$ (SUSCEPTIBILITE TOTALE A TEMPERATURE AMBIANTE) EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POUR LES ECHANTILLONS DU PRISME DE LA PALISSE AU BORD (A) ET AU CENTRE (B). ....	151
FIGURE 5- 17 : FABRIQUES MAGNETIQUES DU PRISME DE LA PALISSE POUR (A) LES ECHANTILLONS INCLUS DANS LE RECTANGLE ROUGE DU BORD DU PRISME (NOIR) VERS LE CENTRE (GRIS CLAIR) ET DES ECHANTILLONS INTERMEDIAIRES (GRIS FONCE) ; LA FLECHE NOIRE CORRESPOND AU SENS D'ECOULEMENT DE LA LAVE DEDUIT DE LA CARTE GEOLOGIQUE, PRISME EN VUE DU DESSOUS. (B) LA FABRIQUE MAGNETIQUE GLOBALE DES TOUS LES ECHANTILLONS AVEC LES AXES PRINCIPAUX MOYENS $K_1$ (CARRE BLANC), $K_2$ (TRIANGLE BLANC) ET $K_3$ (CERCLE BLANC) ; LA FLECHE BLANCHE CORRESPOND AU SENS D'ECOULEMENT DEDUIT DE L'ASM. (C) LES TROIS FABRIQUES MAGNETIQUES POUR LES ECHANTILLONS DU BORD, INTERMEDIAIRES ET DU CENTRE DU PRISME. (D) LE DEGRE D'ANISOTROPIE $P'$ EN FONCTION DE LA SUSCEPTIBILITE MOYENNE $K_m$ ET LE PARAMETRE DE FORME T (JELINEK, 1981) EN FONCTION DE $P'$ POUR LES ECHANTILLONS DU BORD (NOIR), INTERMEDIAIRES (GRIS FONCE) ET DU CENTRE (GRIS CLAIR) DU PRISME. ....	153
FIGURE 5- 18 : CARTE DE DISTRIBUTION EN COURBES D'ISOVALEUR DES PARAMETRES D'ANISOTROPIE ( $P'$ , $K_m$ ET T) DES ECHANTILLONS ISSU DU PRISME DE LA PALISSE. ....	154
FIGURE 5- 19 : CARTE DE DISTRIBUTION DES PARAMETRES DU DEGRE D'ANISOTROPIE $P'$ , DE LA SUSCEPTIBILITE MOYENNE $K_m$ ET DU PARAMETRE DE FORME T DES ECHANTILLONS ISSUS DU PRISME DE LA PALISSE SOUS FORMAT DE CARTE « MOSAÏQUE ». ....	154
FIGURE 5- 20 : COURBE SUSCEPTIBILITE MAGNETIQUE NORMALISEE A $K_0$ EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DES ECHANTILLONS DU PRISME DE LA COULEE DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. (A) COURBE THERMOMAGNETIQUE REPRESENTATIVE DES ECHANTILLONS DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER JUSQU'A 700°C. LES COURBES THERMOMAGNETIQUES DES ECHANTILLONS ISSUS DU SOMMET DE PRISME (B ET C), DU MILIEU (D ET E) ET DE LA BASE (F ET G) SONT PRESENTEES. LES ECHANTILLONS NOMMES A SONT ISSUS DU BORD DU PRISME ET D DU CENTRE. ....	155
FIGURE 5- 21 : FABRIQUES MAGNETIQUES DU PRISME DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER POUR (A) LES ECHANTILLONS INCLUS DANS LE RECTANGLE ROUGE DU BORD DU PRISME (NOIR) VERS LE CENTRE (GRIS CLAIR) ET DES ECHANTILLONS INTERMEDIAIRES 1 ET 2 (GRIS INTERMEDIAIRES) ; (B) LA FABRIQUE MAGNETIQUE DE TOUS LES ECHANTILLONS AVEC LES AXES PRINCIPAUX $K_1$ (CARRE BLANC), $K_2$ (TRIANGLE BLANC) ET $K_3$ (CERCLE BLANC) ; (C) LES FABRIQUES MAGNETIQUES POUR LES ECHANTILLONS DU BORD, INTERMEDIAIRES 1 ET 2 ET DU CENTRE DU PRISME. (D) LE DEGRE D'ANISOTROPIE $P'$ EN FONCTION DE LA SUSCEPTIBILITE MOYENNE $K_m$ ET LE PARAMETRE DE FORME T (JELINEK, 1981) EN FONCTION DE $P'$ POUR LES ECHANTILLONS DU BORD, INTERMEDIAIRES 1 ET 2 ET DU CENTRE DU PRISME. ....	157
FIGURE 5- 22 : CARTE DE DISTRIBUTION EN COURBES D'ISOVALEUR DES PARAMETRES D'ANISOTROPIE ( $P'$ , $K_m$ ET T) DES ECHANTILLONS ISSUS DU PRISME DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. ....	158
FIGURE 5- 23 : CARTE DE DISTRIBUTION DE TYPE « MOSAÏQUE » DES PARAMETRES DU DEGRE D'ANISOTROPIE ( $P'$ , $K_m$ ET T) DES ECHANTILLONS ISSUS DU PRISME DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. ....	158
FIGURE 5- 24 : COURBE D'HYSTERESIS THEORIQUE DES PARTICULES FERROMAGNETIQUES ET LES PARAMETRES D'HYSTERESIS. $M_s$ EST L'AIMANTATION A SATURATION, $M_{rs}$ L'AIMANTATION REMANENTE A SATURATION, $H_c$ LE CHAMP COERCITIF (SOUQUE, 2002). ....	159
FIGURE 5- 25 : CYCLE D'HYSTERESIS DES ECHANTILLONS ISSUS DU PRISME DE LA PALISSE. (A) L'ECHANTILLON LP1 QUI POSSEDE LA VALEUR DE $H_c$ LA PLUS ELEVEE, (B) L'ECHANTILLON LP8 AVEC $H_c$ LA PLUS FAIBLE, (C) L'ECHANTILLON LP39-1 DONT $M_r$ ET $M_s$ SONT LES PLUS FAIBLES, ET (D) L'ECHANTILLON LP130 DONT LES VALEURS DE $M_r$ ET $M_s$ SONT LES PLUS ELEVEES. SEUL L'ECHANTILLON LP8 PRESENTE UNE COURBE DIFFERENTE DES 3 AUTRES ECHANTILLONS, INDIQUANT UN MELANGE DE MINERAUX FERROMAGNETIQUES ET PARAMAGNETIQUES, ALORS QUE LES AUTRES ECHANTILLONS MONTRENT ESSENTIELLEMENT LA PRESENCE DE MINERAUX FERROMAGNETIQUES DU PSEUDOMONODOMAIN. ....	161
FIGURE 5- 26 : COURBES D'HYSTERESIS DES ECHANTILLONS ISSUS DU PRISME DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. (A) L'ECHANTILLON SAC001 QUI PRESENTE LA VALEUR MAXIMUM DE $M_r$ , (B) L'ECHANTILLON SAC017 AVEC LA VALEUR DE $H_c$ MINIMUM, (C) L'ECHANTILLON SAC-021 AVEC $H_c$ MAXIMUM ET $M_s$ MINIMUM ET (D) L'ECHANTILLON SAC028 AVEC $M_r$ MINIMUM. CES ECHANTILLONS MONTRENT L'HETEROGENEITE DES PARAMETRES D'HYSTERESIS DANS LE PRISME DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. ....	162

FIGURE 5- 27 : (A) PRISME DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER DONT LES COULEURS CORRESPONDENT A L'EMPLACEMENT DES ECHANTILLONS DANS LE PRISME. (B) PARAMETRES D'HYSTERESIS DES ECHANTILLONS ISSUS DU PRISME DE LA PALISSE (NOIR) ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER (COULEURS) PROJETES DANS UN DIAGRAMME $M_{rs}/M_r$ EN FONCTION DE $H_{cr}/H_c$ (DUNLOP, 2002). LES LIMITES DU PSEUDOMONODOMAINES SONT CELLE DEFINIES PAR DUNLOP (2002) POUR LA TITANOMAGNETITE (TM60). LES LIMITES VERTICALES $M_{rs}/M_s$ POUR LA TITANOMAGNETITE SONT MOINS BIEN CONTRAINTEES. A TITRE INDICATIF, NOUS AVONS REPORTE SUR LA FIGURE LES LIMITES DES DIFFERENTS DOMAINES DE LA MAGNETITE (LIGNE EN POINTILLE). ....	163
FIGURE 5- 28 : SUSCEPTIBILITE MOYENNE $K_m$ , DEGRE D'ANISOTROPIE $P'$ ET PARAMETRE DE FORME $T$ EN FONCTION DE L'EMPLACEMENT DE LA CAROTTE (DE LA BASE DE LA COLONNE 1 JUSQU'AU AU SOMMET 17, ET AU CONTACT AVEC L'ENTABLEMENT 18 ET 19). LA MOYENNE (CARRE ROUGE) CORRESPOND A LA VALEUR MOYENNE POUR CHAQUE PARAMETRE DES SPECIMENS A, B ET C ISSUS DE LA CAROTTE. LES VALEURS DE CHAQUE PARAMETRE DES SPECIMENS A (TRIANGLE VERT), B (CERCLE MAUVE) ET C (LOSANGE BLEU) SONT EGALEMENT INDIQUEES. ....	165
FIGURE 5- 29 : (A)PARAMETRES D'HYSTERESIS DES ECHANTILLONS ISSUS DU PRISME DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER PROJETES DANS UN DIAGRAMME $M_{rs}/M_r$ EN FONCTION DE $H_{cr}/H_c$ (DUNLOP, 2002). LES LIMITES DU PSEUDOMONODOMAINES SONT CELLE DEFINIES PAR DUNLOP (2002) POUR LA TITANOMAGNETITE (TM60). LES LIMITES VERTICALES $M_{rs}/M_s$ POUR LA TITANOMAGNETITE SONT MOINS BIEN CONTRAINTEES. A TITRE INDICATIF, NOUS AVONS REPORTE SUR LA FIGURE LES LIMITES DES DIFFERENTS DOMAINES DE LA MAGNETITE (LIGNE EN POINTILLE). (B) AGRANDISSEMENT DE LA ZONE DE PROJECTION DES DONNEES. ....	166
FIGURE 5- 30 : VARIATIONS DES CONCENTRATIONS EN ELEMENTS MAJEURS $MgO$ ET $TiO_2$ (% POIDS) ET TRACES $Sr$ ET $Ni$ (PPM) DE LA BASE VERS LE SOMMET DU FRAGMENT DE PRISME DE LA COLONNADE DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. ....	168
FIGURE I- 1 : DIAGRAMME DE L'AIMANTATION INDUITE $M$ ( $A.M^{-1}$ ) EN FONCTION DU CHAMP INDUCTION $H$ ( $A.M^{-1}$ ) AVEC $K$ LA PENTE DES COURBES DES PRINCIPAUX COMPORTEMENTS MAGNETIQUES. POUR LES FERROMAGNETIQUES, $M_r$ EST L'AIMANTATION REMANENTE ET $M_s$ L'AIMANTATION A SATURATION. ....	4
FIGURE I- 2 : ELLIPSOÏDE DE SUSCEPTIBILITE MAGNETIQUE .....	5
FIGURE IV- 1 : PRISME DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER, LES NUMEROS CORRESPONDENT AUX ECHANTILLONS DONT LES PARAMETRES D'HYSTERESIS ONT ETE MESURES, LES COULEURS SONT REPORTEES DANS LA FIGURE 5-27 DU CHAPITRE 5. ....	58

## Tableaux :

TABLEAU 1- 1 : COMPOSITION CHIMIQUE EN ELEMENTS MAJEURS DE LA COLONNADE ET L'ENTABLEMENT ISSUS DE LA CHAUSSEE DES GEANTS, D'APRES <i>TOMKEIEFF, 1940</i> . ....	25
TABLEAU 2- 1 : COORDONNEES GPS ET UTM (UNIVERSAL TRANSVERSE MERCATOR) 31N DES SITES D'ECHANTILLONNAGE. ELLIPSOÏDE DE REFERENCE WGS84. ....	39
TABLEAU 2- 2 : AGES (K-AR) DES QUATRE COULEES DE LA SERIE DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER FOURIS, 1989.....	48
TABLEAU 3- 1 : GAMMES DE VARIATIONS DES COMPOSITIONS EN ELEMENTS MAJEURS ET TRACES NORMALISEES A 100 DES ECHANTILLONS ISSUS DES DIFFERENTS NIVEAUX DES COULEES DE LA PALISSE ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER, MESURES PAR FLUORESCENCE X. $N$ EST LE NOMBRE D'ECHANTILLONS ANALYSES POUR CHAQUE NIVEAU. LES CHIFFRES EN GRAS ITALIQUE INDIQUENT LES TENEURS MINIMALES ET MAXIMALES DE CHAQUE ELEMENT POUR LES DEUX COULEES. ....	65
TABLEAU 3- 2 : GAMMES DE VARIATIONS DES TERRES RARES DES DIFFERENTS NIVEAUX DES COULEE DE LA PALISSE ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER, ANALYSEES PAR ICP-AES. LES VARIATIONS DES RAPPORTS TERRES RARES LEGERES SUR TERRES RARES LOURDES $La/Yb$ SONT INDIQUEES. ....	73
TABLEAU 3- 3 : GAMMES DE VARIATIONS DES COMPOSITIONS DES CLINOPYROXENES ET DES PLAGIOCLASES DES ECHANTILLONS DES DIFFERENTS NIVEAUX DES COULEES DE LA PALISSE ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. POUR LES CLINOPYROXENES, LES COMPOSITIONS SONT EXPRIMEES EN PROPORTIONS DES POLES WOLLASTONITE (Wo), ENSTATITE (En) ET FERROSILITE (Fs). POUR LES PLAGIOCLASES, LES COMPOSITIONS SONT EXPRIMEES EN PROPORTIONS DES POLES ANORTHITE (An), ALBITE (Ab) ET ORTHOSE (Or). $N$ EST LE NOMBRE DE GRAINS ANALYSES PAR NIVEAU DE CHAQUE COULEE.....	75
TABLEAU 3- 4 : GAMME DE VARIATION EN PROPORTION DE FORSTERITE (Fo) DES OLIVINES DES ECHANTILLONS ISSUS DES DIFFERENTS NIVEAUX DES COULEES DE LA PALISSE ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER.....	78

TABLEAU 3- 5 : COMPOSITION DES TITANOMAGNETITES DES DIFFERENTS NIVEAUX DES COULEES DE LA PALISSE ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. $X_{ULVOSP}$ ES LA PROPORTION D'ULVÖSPINELLE DANS LE SYSTEME MAGNETITE-ULVÖSPINELLE, $FeO$ , $Fe_2O_3$ ET $TiO_2$ SONT EXPRIMES EN POURCENTAGE MOLAIRES. ....	80
TABLEAU 3- 6 : RAPPORTS ISOTOPIQUES DE L'HYDROGENE ET DE L'OXYGENE POUR LES ECHANTILLONS ISSUS DES DIFFERENTS NIVEAUX DE LA COULEE DE LA PALISSE ET POUR LES ECHANTILLONS ISSUS DE LA COLONNE DE LA COULEE DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. LES % D'EAU DANS L'ECHANTILLON AINSI QUE LE RENDEMENT THEORIQUE POUR CHAQUE ECHANTILLON UTILISE SONT EGALEMENT REPORTEES. LES ECHANTILLONS NOTES B SONT SITUE AU BORD DE LA CAROTTE (DONC AU BORD DU PRISME) ET LES ECHANTILLONS NOTES BOT AU FOND DE LA CAROTTE (DONC A L'INTERIEUR DU PRISME). ....	82
TABLEAU 5- 1 : PROPORTIONS MOLECULAIRES EN WOLLASTONITE (Wo), ENTASTITE (En) ET FERROSILLITE (Fs) POUR LES CLINOPYROXENES ET EN ANORTHITE (An), ALBITE (Ab) ET ORTHOSE (Or) POUR LES PLAGIOCLASES, DES ECHANTILLONS ISSUS DU BORD ET DU CENTRE DES PRISMES DE LA PALISSE ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER, AINSI QUE DES DIFFERENTES ZONES DE L'ECHANTILLON STA-B1. N EST LE NOMBRE DE GRAINS ANALYSES.....	141
TABLEAU 5- 2 : COMPOSITIONS DES TITANOMAGNETITES $Fe_{1-x}Ti_xO_4$ ISSUES DU BORD ET DU CENTRE DES PRISMES DE LA PALISSE ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER. $X_{ULVOSP}$ EST LA PROPORTION D'ULVÖSPINELLE, $FeO$ , $Fe_2O_3$ ET $TiO_2$ SONT EN PROPORTIONS MOLAIRES. N EST LE NOMBRE DE GRAINS ANALYSES. ....	144
TABLEAU 5- 3 : RAPPORTS ISOTOPIQUES DE L'HYDROGENE ET DE L'OXYGENE DES ECHANTILLONS ISSUS DES PRISMES DE LA PALISSE ET DE SAINT-ARCONS-D'ALLIER (STA-F ET STA-G). LES POURCENTAGES D'EAU REPORTEES SONT MESURES AU COURS DE LA PROCEDURE D'EXTRACTION DE L'HYDROGENE. ....	146
TABLEAU I- 1 : LISTES DES PARAMETRES ISSUES DU RAPPORT DES AXES PRINCIPAUX DE L'ELLIPSOÏDE DE SUSCEPTIBILITE MAGNETIQUE. 5	





# Introduction générale

Des structures prismées sont fréquemment observées dans les coulées de lave à travers le monde, comme les exemples célèbres de la Chaussée des Géants (Irlande), les coulées de la Columbia River (USA) ou encore les coulées du Massif Central français. Ces structures courantes mais remarquables ont attiré l'attention des scientifiques dès le 17<sup>ème</sup> siècle, bien qu'à cette époque la connaissance des processus de mise en place des coulées de lave fût encore mince. Le débat sur l'origine des prismes dans les coulées de lave a repris à partir du 20<sup>ème</sup> siècle où les études ont pu s'étoffer grâce à de nouveaux moyens d'investigation. C'est à cette époque qu'apparaît la théorie de la contraction thermique qui stipule que la lave, en se solidifiant et se refroidissant, se contracte ce qui donne lieu à la formation de fractures régulières dans un milieu homogène, formant ainsi les prismes. Depuis lors, cette théorie est demeurée la plus répandue dans la communauté scientifique. Cependant, certaines observations de terrain ne peuvent être expliquées par la seule théorie de la contraction thermique, telles que la présence de cercles inscrits et d'une texture radiaire à l'intérieur des prismes observés à la Chaussée des Géants et en de multiples endroits, la présence de cercles de bulles inscrits dans les orgues et parallèle aux contours (Cap Nègre, France) ou des rubanements qui suivent plus ou moins les contours des prismes (Saint-Arcons-d'Allier, France). Ces trois dernières décennies, de nouvelles théories commencent à faire leur apparition pour expliquer ces observations : digitation par double diffusion (Kantha, 1980, 1981) ou encore digitation par surfusion de constitution (Guy et Le Coze, 1990 ; Gilman, 2009 ; Guy, 2010).

Une autre problématique, qui concerne cette fois la structuration des coulées de lave dans son ensemble, est de comprendre comment une lave liquide a priori en apparence homogène peut en se solidifiant présenter différents niveaux de structuration au sein d'une même coulée. Beaucoup de coulées d'épaisseur importante présentent ainsi trois niveaux de la base vers le sommet (Tomkeieff, 1940) : (i) la colonnade, formée de longs prismes verticaux et réguliers, (ii) l'entablement dans la partie centrale de la coulée, où les prismes sont orientés de manière plus aléatoire, et (iii) une pseudo-colonnade où les prismes sont plus courts et moins réguliers que dans la colonnade. A Hawaï les coulées très récentes (quelques années à dizaines d'années) non canalisées s'écoulant sur les flancs à faible pente du volcan sont d'épaisseur très réduite de quelques décimètres à quelques mètres, et ne sont pas prismées. Par ailleurs, la prismation ne concerne pas que les coulées de lave basaltique puisqu'elle est décrite dans les dykes ou sills de diverses compositions, dans des coulées de lave rhyolitiques et dans certaines coulées pyroclastiques soudées (ignimbrites).

Afin de définir comment ces différents niveaux de prismation apparaissent dans une même coulée et comment se forment les prismes au cours de la solidification et du refroidissement, une caractérisation détaillée des structures observées est nécessaire. Paradoxalement, dans la littérature peu d'études sont consacrées à la caractérisation de ces structures dans les coulées de laves. Les études sont basées soit sur la description de leur forme, des angles des fractures, ou encore sur la régularité des colonnes (e.g., Sosman, 1916, James, 1920) ; soit sur l'analyse des propriétés magnétiques comme l'anisotropie de susceptibilité magnétique, les paramètres d'hystérésis ou encore la rémanence (e.g., Brown, 1964 ; Symons, 1967 ; Radhakrishnamurty et al., 1971). D'autres études complètent la description des structures par l'analyse géochimique ou pétrographique des différents niveaux (Tomkeieff, 1940 ; Long et Wood, 1986). Aucun travail à notre connaissance n'associe l'étude des différentes caractéristiques citées ci-dessus sur une même coulée.

Le but de notre étude est d'utiliser en même temps divers outils sur les mêmes objets à plusieurs échelles afin de mieux caractériser ces différentes structures dans les coulées de lave basaltiques ; ce type d'approche n'a pas été suivi de cette façon dans la littérature jusqu'à présent. Pour cela, nous avons sélectionné deux coulées de laves issues du Massif Central français présentant des structures prismées. La coulée de La Palisse, située dans la province volcanique du Bas-Vivarais, est récente (75 ka), présente les trois niveaux (colonnade, entablement et pseudo-colonnade) et le centre d'émission est connu (le Suc de Bauzon). Cette coulée est donc idéale pour une étude structurale à l'échelle de la coulée, mais présente également une « chaussée des Géants » qui permet l'étude à l'échelle du prisme. La coulée de Saint-Arcons-d'Allier, située dans la province volcanique du Devès, est plus ancienne (600 ka) mais montre une colonnade particulièrement bien développée, des structures circulaires et radiales dans les prismes, et un contact net avec l'entablement, ce qui permet d'étudier plus précisément les caractéristiques qui varient le long d'un fragment de prisme issu de la colonnade. Les caractérisations pétrographiques et texturales sont effectuées à partir de lames minces observées par microscopie optique et étudiées par analyse d'images et mesure de l'orientation préférentielle de réseau. L'étude des variations géochimiques est réalisée par la caractérisation de la composition sur roche totale et minéraux des éléments majeurs, traces et terres ainsi que en isotopes stables de l'hydrogène et de l'oxygène. L'étude des fabriques magnétiques et de la minéralogie magnétique, contrainte par celle des fabriques cristallographiques et de forme permet de caractériser les structures aux différentes échelles.

Notre étude n'a pas pour objectif d'établir les mécanismes physiques de formation des prismes dans les coulées de lave, mais de mettre en évidence une nouvelle approche de caractérisation de ces structures via la diversité des méthodes employées ainsi que d'apporter de nouveaux éléments qui permettront d'enrichir la discussion sur l'origine des différents niveaux observés dans les coulées de lave ainsi que de la formation des prismes.

Ce travail est présenté en 5 chapitres dont le contenu est le suivant :

- Le chapitre 1 présente la problématique de notre étude avec un état de l'art de la prismation dans les coulées de lave regroupant les principales hypothèses depuis le 17<sup>ème</sup> siècle jusqu'à nos jours. Les études récentes y sont décrites en détail et notamment celles qui mettent en avant les analyses géochimiques et des propriétés magnétiques.
- Le chapitre 2 présente le contexte géologique des deux coulées sélectionnées : la coulée de La Palisse et la coulée de Saint-Arcons-d'Allier.
- Le chapitre 3 expose les résultats des observations pétrographiques, texturales et géochimiques à l'échelle des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier.
- Le chapitre 4 est présenté sous forme d'un article et concerne l'étude des structures de la coulée de La Palisse via les fabriques magnétiques, la caractérisation de la minéralogie magnétique, de l'orientation préférentielle de réseau (OPR) et l'orientation préférentielle de forme (OPF).
- Le chapitre 5 est focalisé sur l'étude à l'échelle du prisme des variations pétrologiques, texturales et des propriétés magnétiques.



# Chapitre 1. État de l'art

# Introduction

La formation de prismes est observée dans plusieurs types de roches naturelles comme les argiles, les grès et les roches magmatiques. En métallurgie, des prismes sont également observés lors de la solidification et du refroidissement des métaux. Cette prismation est sujet à discussion depuis la fin du 17<sup>ème</sup> siècle avec des articles essentiellement consacrés à la description de la Chaussée des Géants, en Irlande. La plupart des articles concernant la prismation portent sur des roches magmatiques et notamment des laves. Afin de mieux appréhender l'étude de la prismation dans les roches magmatiques, il est important de faire un bilan des travaux qui ont été réalisés à ce sujet. De nombreux articles sont apparus entre le 17<sup>ème</sup> et le 20<sup>ème</sup> siècle essentiellement basés sur la description d'affleurements. Même si les techniques d'analyse et les connaissances étaient moins avancées que maintenant, certaines théories évoquées pour expliquer la formation de ces prismes restent d'actualité, ce qui justifie le recensement des principales études de l'époque. Ce n'est qu'à partir du 20<sup>ème</sup> siècle que les études commencent à se diversifier avec les nouvelles techniques d'analyse comme la géochimie ou les études magnétiques. Quelques théories permettant d'expliquer la prismation sont alors mises en avant. La contraction thermique est la théorie qui est la plus répandue actuellement. Cette théorie stipule qu'un liquide homogène, au cours de son refroidissement, se transforme en un solide qui se contracte et se fracture en formant des prismes réguliers. Pourtant, cette théorie ne permet pas de répondre à certaines observations de terrain comme le fait (i) d'avoir plusieurs niveaux de prismation à l'intérieur d'une même coulée de lave, (ii) ou l'observation de cette prismation essentiellement dans des coulées de plusieurs mètres d'épaisseur, ou encore (iii) l'observation de structures circulaires et radiales inscrites à l'intérieur des prismes. La contraction thermique joue un rôle évident dans le refroidissement d'une lave en surface mais n'est peut-être pas le seul phénomène à intervenir dans la formation des structures prismées. Nous nous sommes donc intéressés également aux autres théories évoquées pour expliquer cette prismation et aux techniques employées pour les mettre en évidence. Si d'autres phénomènes interviennent dans la formation des prismes, les études géochimiques et pétrophysiques peuvent apporter des éléments de réponse. Nous avons donc répertorié les études apportant des données géochimiques et des données magnétiques dans des laves.

Dans ce chapitre, nous avons réalisé un historique non exhaustif des différentes études et théories sur la prismation dans les roches magmatiques. Dans un premier temps, un historique des principales études portant sur la prismation dans les roches magmatiques du 17<sup>ème</sup> siècle à nos jours en faisant ressortir les principales théories permettant d'expliquer la formation des prismes. Puis nous présentons les études pétrologiques, géochimiques et magnétiques qui ont été réalisées sur des laves prismées. Nous discuterons lors de la conclusion de nos résultats au regard des principales hypothèses sur la prismation dans les coulées.

## 1. Historique des études menées sur la prismation dans les roches magmatiques

### 1.1. Du 17<sup>ème</sup> au 19<sup>ème</sup> siècle

Cette partie est basée essentiellement sur la bibliographie assez complète que réalise Tomkeieff (1940) sur les articles du 17<sup>ème</sup> au 19<sup>ème</sup> siècle concernant la prismation dans les roches magmatiques.

Une première période d'investigation consiste essentiellement en la description d'affleurements et notamment celui de la Chaussée des Géants en Irlande du Nord qui présente des coulées de lave dont la prismaticité est particulièrement bien développée. Cette description initiée par Sir Richard Bulkeley (1693) fut ensuite corrigée par Foley (1694) (*Figure 1-1*). Toutefois, le premier à décrire les joints caractéristiques de cette coulée entre les colonnes et à s'intéresser à la nature de la roche qui compose la Chaussée des Géants fut Molyneux (1698). A l'époque, les scientifiques ne faisaient pas systématiquement le déplacement sur les lieux de l'objet d'étude mais se basaient sur des représentations. Molyneux envoie alors Edwin Sandys pour réaliser une première représentation de l'affleurement de la Chaussée des Géants (Sandys 1697) (*Figure 1-2*) qui sera malheureusement un peu trop artistique et mettra fin à la première période d'investigations.

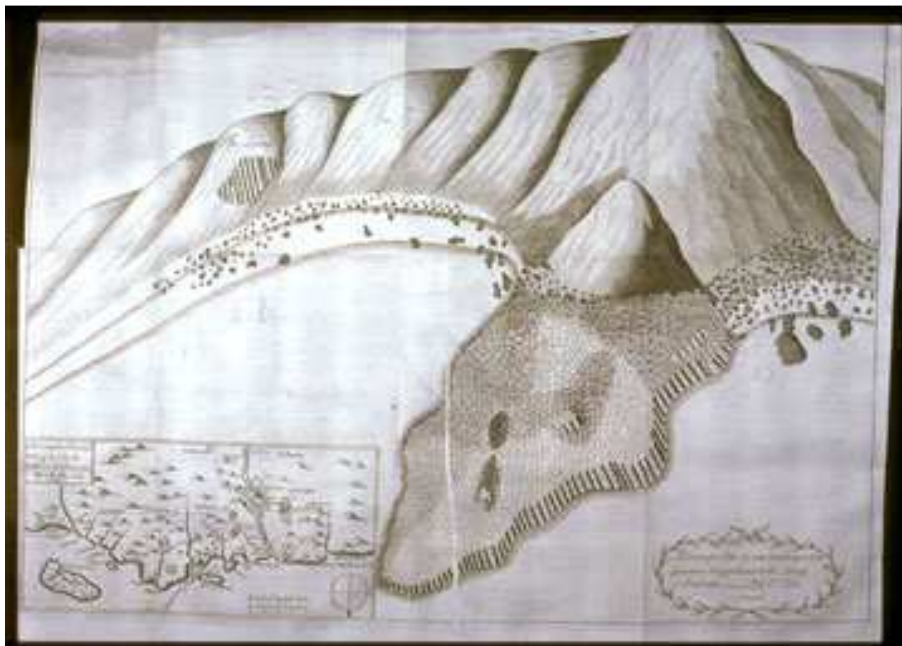


Figure 1-1: Première représentation de la Chaussée des Géants en Irlande du Nord réalisée par Christopher Cole et publiée par Foley en 1694.



Figure 1-2: Représentation de la chaussée des Géants par Sandys, 1697.





A partir de la publication de Desmarest (1771), de nombreuses descriptions de la Chaussée des Géants ont été faites sur la succession des différentes coulées et leur structure particulière découpée en deux zones. Ces deux zones sont décrites de la façon suivante :

- La zone supérieure composée de colonnes peu espacées entre elles et ondulées ou de larges colonnes verticales (pseudo-colonnade), ou les deux. La partie la plus haute de cette zone étant souvent vésiculée et scoriacée.
- La zone inférieure composée de colonnes régulières et verticales.

Afin de simplifier cette description, Tomkeieff (1940) propose d'utiliser les termes d'*entablature* (ou *entablement*) pour la zone supérieure et de *colonnade* pour la zone inférieure. Il fait une description détaillée de la structure de la coulée de la Chaussée des Géants (*Figure 1-5*) et divise la coulée en deux séries : les coulées supérieures et inférieures (« Upper and Lower lavas »). L'auteur liste également les différentes hypothèses avancées à l'époque pour expliquer la formation des prismes dans les roches magmatiques. La première qu'il cite est l'hypothèse de la cristallisation, mis en avant pendant le 19<sup>ème</sup> siècle, qui stipule que les colonnes ressemblent à des cristaux de certains minéraux comme le quartz ou la tourmaline. Certaines gravures anciennes représentaient même la terminaison des colonnes en pyramide (Gesner 1565) (*Figure 1-6*). Cette hypothèse fut abandonnée au milieu du 18<sup>ème</sup> siècle et reprise par O'Reilly (1879).

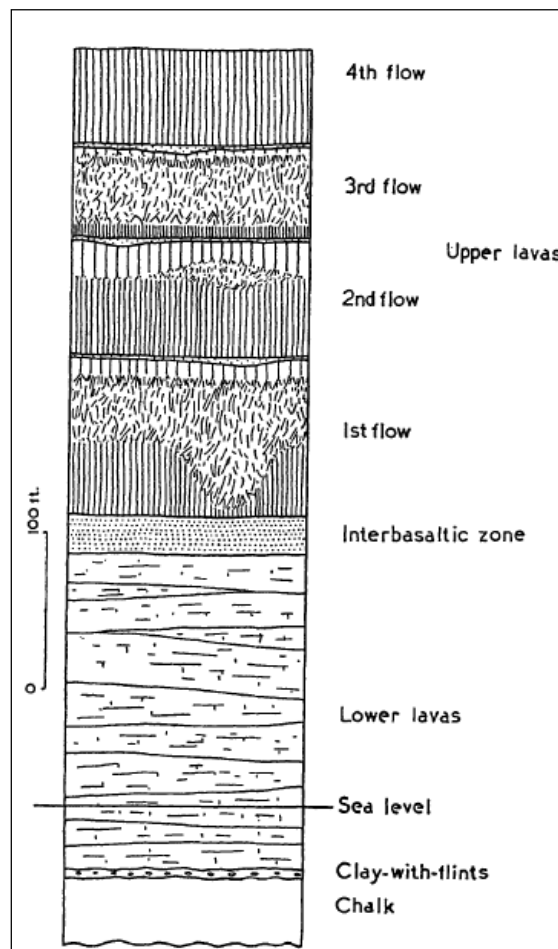


Figure 1-5: Schéma de la succession des différentes coulées de la Chaussée des Géants, Tomkeieff, 1940.

La seconde hypothèse évoquée est celle de la contraction qui explique la fracturation comme étant due à la contraction de la roche pendant le refroidissement. Elle fut suggérée pour la première fois par Raspe (1776) qui pensait qu'un refroidissement sous marin provoquait ces fractures. Il fut montré plus tard qu'un refroidissement aérien suffisait. Cette hypothèse fut acceptée et développée par plusieurs auteurs (Scrope 1825; Mallet 1875; Bonney 1876; Iddings 1886; Iddings 1909; James 1920) et est encore de nos jours acceptée par beaucoup de géologues comme étant la seule explication à cette fracturation.

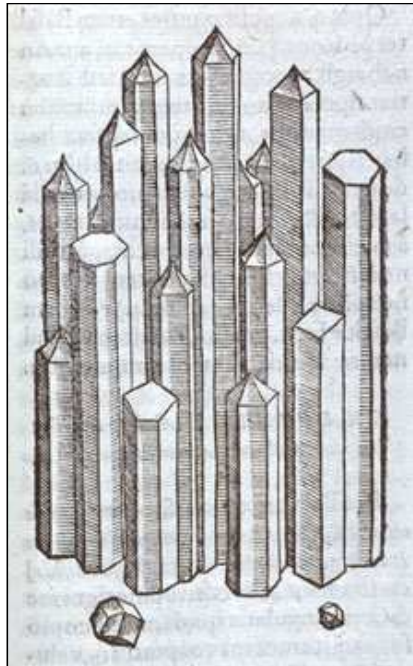


Figure 1-6 : Représentation de colonnes de basalte d'après Konrad Gesner, 1565.

Une troisième hypothèse est évoquée mais qui n'a qu'un intérêt historique. L'hypothèse de la cristallisation-concrétion fut suggérée par Watt (1804) qui observe que des structures sphérulitiques (structure radiaire) tendent à se développer lors de la cristallisation des basaltes, ce qui l'amène à penser que l'arrangement de façon régulière de ces sphérulites est à l'origine de la structure en colonne.

Une quatrième hypothèse est celle de la convection, développée par Bénard (1900) et Dauzère (1907) qui proposent que les courants de convection dans un magma en refroidissement seraient responsables de la formation des colonnes.

Mallet (1875) étudie le mécanisme de la prismation dans les roches magmatiques et donne une explication mathématique de la formation des prismes. Il montre alors que les forces de contraction suffisent à produire des prismes, par la fracturation, dans une grande masse de matériel homogène. L'homogénéité plus ou moins importante de cette masse peut modifier les formes dessinées par les fractures. Pour Mallet, chaque prisme présente un processus de refroidissement qui part de la surface supérieure de la lave et qui commence à se subdiviser (*Figure 1-7a*), puis la subdivision se poursuit dans la masse de lave de manière égale (*Figure 1-7b*) jusqu'à présenter des colonnes individuelles dans un stade plus avancé (*Figure 1-7c*), où le refroidissement ne se fait plus uniquement en surface mais également pas les côtés de chaque prisme nouvellement formé. La

progression du refroidissement est décrite par les courbes isothermes dans le plan vertical entre la surface et l'axe du prisme. Pour décrire le mode de formation des joints entre les prismes, Mallet suppose que la masse de basalte est isotrope avec des coefficients de contraction identiques dans toutes les directions. La taille des prismes est alors contrôlée par deux paramètres : la distance entre les centres de deux prismes voisins (AB) et le diamètre des prismes (ab), ces deux longueurs devant être égales. Les forces de contraction, étant plus intense au bord du prisme qu'au centre, permettent l'apparition des fractures qui se propagent en profondeur. Thomson (1882) et Preston (1926) suggèrent que les fissures commencent à l'extérieur des colonnes et se propagent vers l'intérieur. Preston explique la courbure des plans des joints entre les colonnes par le fait que le refroidissement ne se fait pas à égale vitesse dans toutes les directions. La différence entre la colonnade et l'entablement étant attribuée aux différentes vitesses de refroidissement de la lave du sommet vers la base, plus le refroidissement est rapide et plus les fractures dues au retrait sont rapprochées. La partie supérieure de la lave où les colonnes sont plus fines refroidit plus rapidement que la partie inférieure (Iddings 1909). Tomkeieff (1940) conteste ces affirmations en indiquant qu'à la Chaussée des Géants, les fractures sont largement plus espacées dans la partie supérieure que dans la partie inférieure et que les fractures les plus proches les unes des autres se trouvent dans la partie intermédiaire de la coulée où le refroidissement n'est pas très rapide.

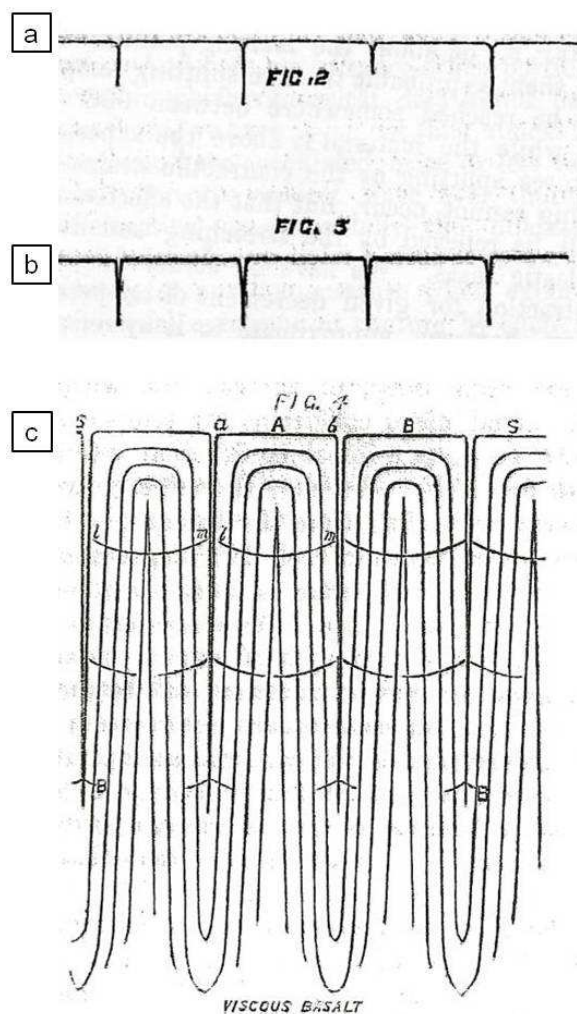


Figure 1-7: Illustration de la formation des prismes (*Mallet, 1875*). Le plan SS correspond au sommet des prismes et la surface à partir de laquelle la masse de basalte commence à se subdiviser. Les points B correspondent aux points les plus bas à partir desquels se développent les fractures au cours d'un refroidissement plus avancé. *ab* est la distance de part et d'autre d'un prisme, A et B représentent les centres des prismes. Les courbes correspondent aux isothermes (les plus froides à l'extérieur du prisme et les plus chaudes vers l'axe du prisme).

## 1.2. A partir du 20<sup>ème</sup> siècle

A partir du 20<sup>ème</sup> siècle, les études sur la prismation dans les roches magmatiques commencent à apporter des analyses quantitatives aux explications purement qualitatives. Sosman (1916), en discutant les différentes hypothèses déjà émises, admet que la contraction thermique est probablement l'hypothèse qui permet d'expliquer la prismation dans la plupart des roches magmatiques. Cependant, il déplore le manque d'analyses quantitatives appuyant cette théorie. Selon Sosman, il existe plusieurs façons d'arriver à la rupture de la roche, il propose donc de réaliser une étude complète sur les différents types de structure qui sont issues des différentes conditions de refroidissement. Sosman réalise ainsi des expériences analogiques avec de la cire fondue afin d'illustrer l'hypothèse de la formation de prisme par la convection. Afin de trancher qui de la contraction ou de la convection est à l'origine de la formation des prismes, il procède à une étude systématique des colonnes dans la nature et cherche à comparer la position des colonnes par rapport à la surface de refroidissement, leurs dimensions, la forme des sections, la fréquence des angles des polygones, la différence de composition et de texture entre le centre et le bord des colonnes, les formes des joints entre les colonnes et les irrégularités des faces des prismes. Ces mesures lui permettent de conclure que plusieurs types de structures prismées peuvent être distinguées dans les roches magmatiques. La première et la plus commune est celle obtenue par la seule contraction thermique dans les roches cristallisées. Une autre structure due à la contraction apparaît quand le magma est en partie solide et liquide. Le second type de structures prismées est produit par circulation du magma encore liquide, sous la forme de cellules de convection qui persistent jusqu'à ce que la solidification commence. Les traces de cette convection sont enregistrées dans la roche lors de la ségrégation du magma sur les parois des cellules convectives ou par cristallisation au centre de ces cellules. Mais les preuves restent minces pour affirmer clairement l'existence de telles cellules. Le troisième type de structures prismées est produit par « expansion interne » qui permet d'expliquer les cas qui ne correspondent pas aux deux premiers types de structures.

James (1920) utilise la même démarche que Sosman (1916) en étudiant plusieurs caractéristiques de la prismation comme la position, la taille, la forme et la régularité des colonnes. Ces caractéristiques dépendent de plusieurs paramètres comme la viscosité et la température de la lave, la vitesse de refroidissement, la régularité du refroidissement et l'homogénéité de la lave. Pour James (1920), le facteur qui contrôle le plus la formation des colonnes est la contraction thermique. La taille des colonnes dépend de la température et de la vitesse de refroidissement : plus le refroidissement est rapide et plus les colonnes sont fines. Le fait que le basalte possède une conductivité thermique faible et qu'une grande épaisseur de basalte refroidit lentement amène l'auteur à penser que la structure prismée est due à un refroidissement lent plutôt que rapide. Les prismes sont moins bien développés dans les coulées fines à cause de « l'hétérogénéité » de la lave et du refroidissement rapide. La partie supérieure des coulées (pseudo-colonnade) présente des colonnes moins régulières que James explique par une « hétérogénéité » plus importante par rapport à la partie inférieure (colonnade). Pour James (1920) comme pour Fuller (1938), la convection

comme hypothèse expliquant la formation des prismes développée par Sosman (1916) ne peut être cohérente avec leurs observations de terrain.

Tomkeieff (1940) est le premier à décrire précisément les différents étages des coulées prismées à partir de la Chaussée des Géants et en donne une terminologie qui est toujours employée. La colonnade à la base de la coulée est constituée de colonnes régulières et la partie située au-dessus, l'entablement, est constituée dans la zone inférieure de prismes courbes et dans la zone supérieure d'une pseudo-colonnade. Il décrit alors précisément la coulée de la Chaussée des Géants. Deux séries de coulées sont séparées par une zone majeure interbasaltique (*Interbasaltic zone*) composée de latérites et de bauxites (*Figure 1-5*). Tomkeieff décrit les coulées inférieures (*Lower lavas*) comme étant composées de basalte à gros grains d'olivine ou dolérite. Les parties supérieures et parfois inférieures de ces coulées sont très vésiculées et zéolitiques. Ces coulées sont relativement fines et développent occasionnellement une pseudo-colonnade. Chaque coulée présente une surface supérieure rouge qui, quand elle est complètement développée, est composée de latérite comme la zone interbasaltique. L'épaisseur de la coulée inférieure est estimée à environ 61 m (200 feet) et regroupe 7 ou 8 coulées dans la partie exposée, et 11 au total avec la partie immergée. L'épaisseur de ces fines coulées est en moyenne de 6 m (20 feet).

Les coulées supérieures (*Upper lavas*) sont composées de basalte tholéïtique compact à grains fins, divisées en colonnade et entablement et relativement épaisses. Quatre coulées peuvent être distinguées, chacune étant composée d'une colonnade et d'un entablement et dont l'épaisseur varie entre 30 et 18m (100 et 60 feet). Chaque coulée est séparée par une petite zone interbasaltique. Tomkeieff détaille la variation des structures de chaque coulée dans la direction verticale mais aussi horizontale. Par exemple pour la première coulée, il constate que la colonnade disparaît presque au profit de l'entablement alors que pour la seconde coulée l'entablement est quasi inexistant (*Figure 1-5*). La largeur des colonnes dans la colonnade est en moyenne de 60 cm (2 feet) alors que celle de l'entablement est souvent inférieure à 30 cm (1 foot). Les colonnes de la pseudo-colonnade, constituant la partie supérieure de l'entablement, sont très larges avec un diamètre moyen de 1,20 m (4 feet).

Tomkeieff décrit plusieurs caractéristiques structurales à l'entablement. Dans un entablement bien développé, sont présents les éléments structuraux suivants (*Figure 1-5*) :

- Une zone supérieure à scories fines et souvent composée de roches altérées ;
- Une zone de pseudo-colonnade composée de bloc épais accolés entre eux et qui peuvent par moment ressembler à des colonnes ;
- Une zone à colonnes incurvées composée de fines colonnes souvent disposées de façon radiaire à partir de certains points situés le long de la partie supérieure de l'entablement (« curvi-columnar »).

Cette description est la plus précise réalisée sur la Chaussée des Géants. Les termes qui y sont employés servent aujourd'hui à décrire des coulées de laves présentant les mêmes caractéristiques structurales. Pour Tomkeieff, la formation de ces trois zones dépend de différents systèmes de joints qu'il explique par l'histoire du refroidissement de la coulée de lave résultant de la variation de la vitesse de propagation des isothermes selon la zone. La diminution de cette vitesse donne dans un premier temps la colonnade et la pseudo-colonnade. Quand la vitesse atteint son minimum, la fracturation s'arrête, ce qui permet une accumulation de contraintes. Lors de la libération de ces

contraintes, la zone intermédiaire se fracture violemment le long de plans incurvés faisant apparaître la zone « curvi-columnar ».

Lafeber (1956) reprend la théorie des courants convectifs pour expliquer la différence d'altération entre le bord et le centre des prismes et rejette le fait que les colonnes puissent se former par simple contraction thermique. Jaeger (1961) établit un modèle de fracturation qui débute à la base et au sommet de la coulée et qui se propage vers l'intérieur où les conditions de solidifications sont différentes et produisent un milieu plus propice aux fractures. Pour Spry (1962), les fractures sont initiées perpendiculairement à des surfaces où la tension est égale en tout point, souvent identiques aux surfaces isothermes, c'est à dire parallèle à la surface de refroidissement.

Les stries que l'on peut observer à la surface des fractures deviennent un nouvel objet d'étude, Ryan et Sammis (1978) établissent une relation entre la largeur de ces stries et le diamètre des colonnes et Degraff et Aydin (1987; 1989; 1993) étudient l'intersection entre ces stries et les fractures et en déduisent le processus de propagation des fractures dans la couche de magma. Ces auteurs proposent également que des circulations d'eau entre ces fractures expliqueraient la différence de structure entre la base et le sommet de la coulée.

Long et Wood (1986) suggèrent qu'une quantité d'eau importante apportée lors d'inondations ponctuelles de la lave en cours de refroidissement expliquerait la formation de l'entablement. Budkewitsch et Robin (1994) proposent qu'un mécanisme de transfert de chaleur par conduction couplé à la convection soit responsable de la formation des prismes.

Une nouvelle théorie apparaît pour expliquer la formation des structures prismées dans les roches magmatiques, il s'agit de la théorie de la digitation. Kantha (1980; 1981) est le premier à évoquer cette théorie sous le nom de procédé de double diffusion (*double-diffusive process*). L'auteur compare en premier lieu des expériences réalisées en laboratoire sur l'eau salée et l'apparition des « salt fingers » avec les prismations dans les laves. Il propose que les structures très ordonnées que l'on observe dans les basaltes puissent être le résultat d'un procédé convectif à double-diffusion dans la lave en cours de refroidissement. Dans le liquide basaltique, la différence de température et de composition entre le haut et la base d'un magma stagnant pourraient conduire à des colonnes très régulières avec le même processus qui conduit aux « salt fingers » dans des eaux salées. L'hypothèse de la digitation par surfusion de constitution est proposée par Guy et Le Coze (1990), Gilman (2009) et Guy (2010) en se basant sur l'instabilité entre le liquide et le front de solidification qui est à l'origine de la digitation.

## 2. Les différentes hypothèses et approches de la prismation

Après avoir revu les différentes publications et hypothèses concernant les structures prismées dans les roches magmatiques, nous pouvons en tirer les hypothèses qui sont encore discutées aujourd'hui. L'hypothèse de la contraction thermique reste l'hypothèse la plus répandue et nous verrons que plusieurs outils se sont développés comme les expériences analogiques pour appuyer. L'hypothèse du refroidissement de la lave et de l'apparition de colonnes par des cellules de convection du magma, dernièrement évoquée par Lafeber (1956), n'est pas discutée dans cette partie



du fait de nombreuses preuves permettant d'écarter cette théorie (cf 4.1). Par contre nous évoquons une nouvelle hypothèse qui fait intervenir la conduction associée à la convection de fluides dans les fractures des colonnes pour refroidir la coulée de lave et former des prismes. Enfin, nous discuterons de la théorie de la digitation qui expose un nouveau processus de formation des prismes dans les laves par analogie avec les processus dans les métaux.

## **2.1. Théorie de la contraction thermique**

### **2.1.1. Description des stries et propagation des fractures**

Les stries qui se développent à la surface des fractures font l'objet de plusieurs études (*Figure 1-8a*). Leur morphologie est décrite par Ryan et Sammis (1978) qui comparent les fractures qui se propagent dans les basaltes avec des travaux expérimentaux. Les auteurs se basent sur la géométrie du « crack-tip » qui correspond à la partie de la fracture qui se situe entre le milieu fracturé et non fracturé. La morphologie des stries dans les basaltes est similaire à celle que l'on observe par exemple dans les alliages d'aluminium, ce qui induit que le phénomène qui fait avancer la fracture dans les basaltes au cours du refroidissement est le même que celui dans les alliages. Ils observent également que plus le diamètre de la colonne est important, plus la largeur des stries est importante. Les fractures dans le basalte arrêtent de se propager pour deux raisons : la première est que les tensions associées à la contraction thermique sont diminuées par le déplacement qui accompagne la fracture, et la deuxième est que la fracture au contact de l'interface liquide-solide avance dans un milieu plus chaud et moins cassant. Grossenbacher (1995) (*Figure 1-8b*) réalise un modèle analytique lui permettant d'établir une corrélation entre la largeur des stries et l'inverse du gradient thermique localisé sur la fracture. Ce modèle prédit un rapport constant entre le diamètre des colonnes et la largeur des stries. Le modèle de propagation des fractures développé par Jaeger (1961) reprend les conclusions de James (1920) en les complétant par un modèle basé sur les isothermes. Il conclut que la colonnade et la pseudo-colonnade se forment au contact d'un milieu plus froid à partir de la surface inférieure et supérieure. Les fractures se propagent alors vers l'intérieur de la coulée jusqu'à atteindre la température où la lave est encore liquide c'est-à-dire au niveau de la zone intermédiaire. Après sa solidification, cette région centrale présentant des contraintes moins organisées que dans les régions périphériques, explique le système de fracturation plus aléatoire de cette zone. Ce modèle est cité dans des études de coulée de lave (Peck & Minakami 1968; Swanson 1967).

### **2.1.2. Les modèles thermodynamiques**

Des modèles numériques sont également développés sur la base d'une fracturation par contraction thermique comme celui de Saliba et Jagla (2003) qui est un modèle de contrainte à 3 dimensions. Lore et al (2000) établissent un modèle mécanique viscoélastique qui met en évidence le rôle de la relaxation viscoélastique sur la fracturation ainsi que celui de la température de transition vitreuse sur les contraintes. Jenkins (2009) propose un modèle numérique de solidification mettant en évidence un système de double fracturation. L'entablement posséderait deux types de fractures : des fractures parallèles et perpendiculaires au plan de solidification, alors que la colonnade présente essentiellement l'un ou l'autre des deux systèmes de fracture.



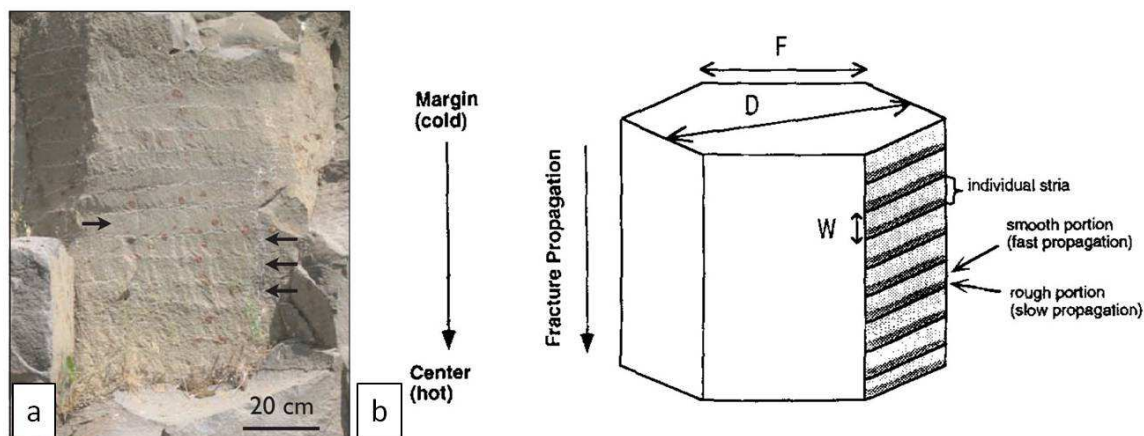


Figure 1-8: Illustration des stries sur les fractures dans des laves. (a) démarcation des stries sur une colonne (Goehring, 2008). (b) Schéma d'une section de prisme (d'après Grossenbacher, 1995). Les stries sont montrées sur l'une des faces du prisme.  $F$  = largeur d'une face du prisme,  $D$  = diamètre de la colonne,  $W$  = largeur d'une strie. Les zones en gris clair représentent des zones tendres où la propagation des fractures est rapide. Les zones en gris foncé représentent des zones plus dures où la propagation des fractures est plus lente.

### 2.1.3. Expériences analogiques

Une autre manière de démontrer que la contraction thermique est à l'origine de la formation des structures prismées est celle de l'expérimentation analogique. Plusieurs publications s'accordent pour dire que les colonnes qui se forment lors de la dessiccation d'un mélange eau-amidon et celles dans les basaltes sont issues du même processus de diffusion de chaleur ou d'eau (Müller 1998a; Müller 1998b; Müller 2001; Toramaru & Matsumoto 2004; Goehring & Morris 2008; Lodge & Lescinsky 2009). La régularité des polygones dans la section des colonnes n'a pas besoin d'être présente en surface de la coulée mais se développe durant la phase initiale de pénétration des fractures dans la couche de lave. Le diamètre de ces colonnes est directement relié à la diffusivité : une diffusivité faible donne lieu à des colonnes de petit diamètre (Müller 1998b; 1998a). Toramaru et Matsumoto (2004) définissent les relations suivantes : l'aire moyenne des sections des colonnes est inversement proportionnelle à la vitesse de refroidissement, cette dernière conditionne la forme du prisme (un taux élevé privilégie les pentagones et un taux faible les hexagones). Ces auteurs établissent également une vitesse de refroidissement en dessous duquel les colonnes ne se développeraient pas (Toramaru & Matsumoto 2004).

## 2.2. Théorie de la conduction-convection

Parmi les études qui citent la contraction thermique comme étant à l'origine des prismes, certaines y associent une convection d'eau sous forme vapeur qui circule entre les colonnes et permet un refroidissement plus rapide notamment de la partie supérieure de la coulée qui comporte l'entablement (Ryan et Sammis 1981; Degraff et al., 1989; DeGraff et Aydin 1987; 1993; Budkewitsch et Robin 1994). Degraff et al. (1989) et Degraff et Aydin (1987; 1993), en étudiant l'intersection entre les fractures et les stries présentes à la surface de ces fractures, concluent que la formation des colonnes se produit par un processus d'incrémentation par lequel de nouvelles fractures s'initient et se propagent en partant des bords des anciennes fractures. Les auteurs en

déduisent que pour beaucoup de coulées de lave présentant plusieurs niveaux de fractures, leur partie supérieure se refroidit plus rapidement que la partie inférieure. La convection de vapeur d'eau entre les colonnes de la partie supérieure en contact avec la surface expliquerait ce refroidissement plus rapide. La partie inférieure étant refroidie par conduction, la perte de chaleur se fait plus lentement. Plus le taux de solidification est rapide, et plus les incréments de croissance des fractures et l'espacement entre les colonnes sont petits (Degraff et Aydin 1987, 1993). Budkewitsch et Robin (1994) proposent qu'un mécanisme de transfert de chaleur par conduction couplé à la convection de fluide entre les colonnes soit responsable de la formation des prismes. Ceci impliquerait que la vitesse de refroidissement d'une coulée est inversement proportionnelle au diamètre des colonnes. Selon les auteurs, le transfert de chaleur convectif se produit le long des fractures alors que le transfert de chaleur conductif part du centre des prismes vers les bords donc vers les fractures.

Ce mode de refroidissement (*Figure 1-9*) concerne essentiellement la partie supérieure des coulées. Cela permet d'expliquer le refroidissement plus rapide de l'entablement par rapport à la colonnade. Long et Wood (1986) et Lyle (2000) évoquent des périodes d'inondation des coulées par l'eau au cours du refroidissement de la lave et qui permet d'introduire de l'eau par les fractures principales et de modifier les isothermes internes, ce qui permettrait la formation de fractures incurvées qui apparaissent dans l'entablement. Les alternances de colonnade et d'entablement observées dans les coulées de laves de Columbia River correspondraient à des périodes de sécheresse et d'inondation.

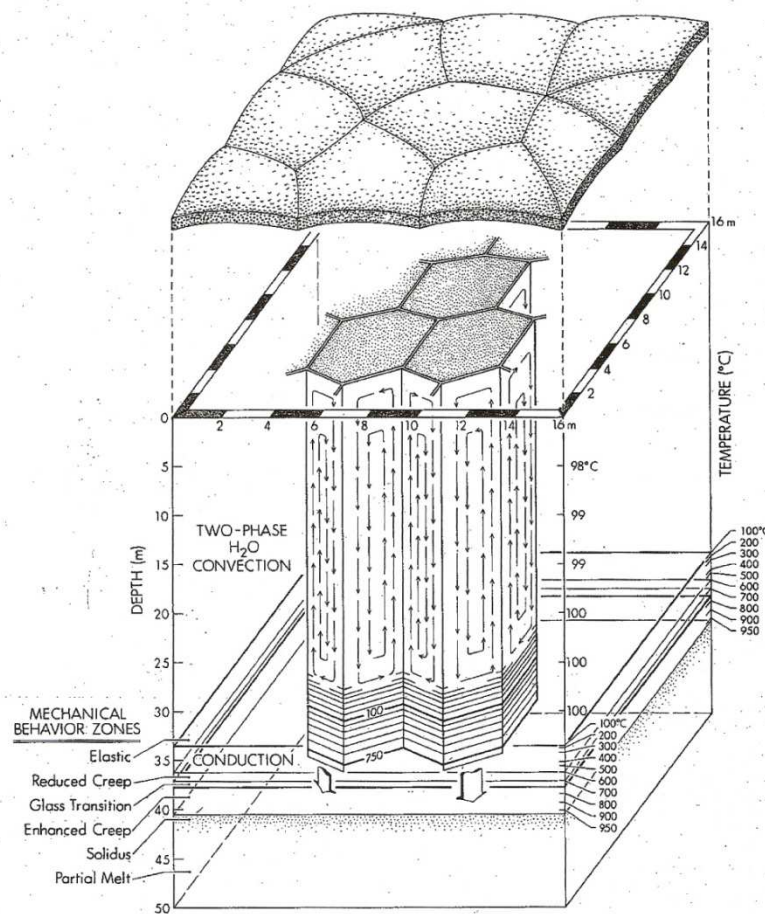


Figure 1-9: Illustration de la perte de chaleur par conduction associée à la convection d'eau entre les colonnes (Ryan et Sammis, 1981).

Le modèle thermique et l'étude de la largeur des stries réalisés par Goehring et Morris (2008) leur permettent de déduire que le processus de refroidissement par convection de vapeur d'eau connu dans la zone supérieure des coulées peut également se produire à la base de la coulée. Ces auteurs concluent alors que la vapeur d'eau, ne pouvant être évacuée de la partie inférieure comme elle le ferait dans la partie supérieure de la coulée, n'est donc pas essentielle dans le processus de refroidissement.

## 2.3. Théorie de la digitation par la double diffusion

Le processus de la double diffusion évoqué par Kantha (1980; 1981) s'applique à un fluide composé de deux composants diffusifs, par exemple la chaleur et le sel, qui conduisent à des instabilités même si la distribution des densités semble stable. Les deux composés doivent avoir des diffusivités différentes pour produire ces instabilités et suffisantes pour s'opposer au gradient de densité. Le fait que les deux composants n'aient pas la même diffusivité (le sel a une diffusivité plus faible que celle de la chaleur) va développer à l'interface des deux milieux de densité différente des cellules ressemblant à « des doigts » (*finger-like cells*) produits en laboratoire et observés dans les océans. Ces structures très ordonnées sont appelées « salt fingers ». Selon Kantha, dans le cas des laves basaltiques, l'un des composants diffusifs est la chaleur et l'autre les éléments chimiques. Une couche de basalte chaud avec une fraction plus riche en certains composants chimiques lourds surplombe une couche de basalte plus froid avec une fraction moins riche en composants chimiques lourds. Dans cette configuration, les couches de basaltes sont stables. Les composants chimiques ayant une diffusivité très faible comparée à celle de la chaleur, des instabilités se produisent et forment des « basalt fingers ». La structure typique en trois étages, colonnade, entablement et pseudo-colonnade, ressemble aux structures observées dans des expériences de digitations induites par une solution sucrée disposée sur une solution salée. Cette expérience produit donc trois niveaux de structure avec des mouvements convectifs dans la couche intermédiaire et la formation de digitation dans les étages inférieur et supérieur. Ce qui expliquerait les structures ordonnées à la base et au sommet, et des structures chaotiques au milieu. Pour retrouver cette structuration dans la roche, Kantha propose que la digitation se produise pendant la solidification. Les structures ainsi formées dans la roche guideraient la fracturation lors de la contraction thermique.

## 2.4. Théorie de la digitation par la surfusion de constitution

Guy et Le Coze (1990) critiquent la théorie de Kantha (1981) en indiquant que les hétérogénéités importantes de composition et de température sont peu réalistes dans des laves et qu'en plus, cette théorie n'explique pas la prismation radiale observée dans certaines coulées. La prismation dans les laves est alors comparée à celle observée dans les métaux où l'interface solide-liquide met en jeu les conductivités thermiques du liquide et du solide, les gradients thermiques à l'interface, la faible vitesse de diffusion des espèces chimiques dans le solide et la différence de solubilité des solutés les plus actifs dans le solide et le liquide. L'équilibre thermique arrive plus rapidement que la mise en place des gradients de concentration des solutés. La morphologie de

l'interface solide-liquide est surtout liée à la valeur du gradient de température à l'interface et à l'envahissement du liquide en soluté. Guy et Le Coze proposent le scénario suivant : quand la concentration en soluté augmente dans le liquide, la température du liquidus diminue (*Figure 1-10a*). La concentration en soluté est alors plus importante dans le liquide que dans le solide et elle diminue brutalement à l'interface solide-liquide (*Figure 1-10b*). Une surfusion d'origine cinématique  $\Delta T$  conditionne la vitesse de germination et de croissance du solide dans le liquide (*Figure 1-10c*). Si  $\Delta T$  n'est pas trop élevé, des structures cellulaires de l'interface se développent. Sur le front de solidification, à la limite du solide et du solide+liquide, une irrégularité se forme (*Figure 1-10d*), la vitesse de croissance du solide de cette irrégularité notée  $f$  est plus rapide au sommet que latéralement et l'irrégularité va croître jusqu'au plan limite (s). Le front de solidification est alors constitué de digitations jointives et parallèles et l'équilibre des forces de tension superficielles donne la forme hexagonale aux cellules. Dans le cas des roches volcaniques, pour obtenir une surfusion et la formation de cellules, Guy et Le Coze proposent qu'un ou plusieurs éléments chimiques soient mobiles entre le solide et le liquide. Dans le cas des roches,  $H_2O$  et des gaz volatils peuvent jouer ce rôle.

La théorie d'une digitation se formant à partir d'instabilité au niveau du front de solidification est également proposée par Gilman (2009) qui critique la théorie standard de la contraction thermique. Guy (2010) commente cette dernière publication et indique que la digitation peut tout de même être associée à de la contraction thermique. Dans certaines parties de la coulée, le fait de trouver des polygones avec des angles à  $90^\circ$  (dans l'entablement) et d'autre à  $120^\circ$  (dans la colonnade) indique que dans le premier cas c'est la contraction thermique qui prédomine alors que dans le second cas, c'est plutôt la digitation. Plusieurs observations de terrain sont présentées dans cet article montrant des caractéristiques difficilement interprétables par la seule contraction thermique comme des vésicules distribuées le long des bords des prismes ou encore des structures radiaires à l'intérieur de cercles contenus dans des prismes (*Figure 1-11*).

### 3. Les études magnétiques et géochimiques de la prismation des laves

Les études magnétiques et géochimiques des roches magmatiques apportent des données à différentes échelles permettant de mettre en évidence certains phénomènes lors de la mise en place et du refroidissement des laves tels que les processus de diffusion, d'oxydation, de transformation minéralogique ou encore d'orientation des minéraux. Ces études sont donc susceptibles d'établir de nouveaux éclairages sur les processus physico-chimiques et la structuration de la lave au moment de son refroidissement et donc d'améliorer notre compréhension sur la formation des structures prismées dans les laves.

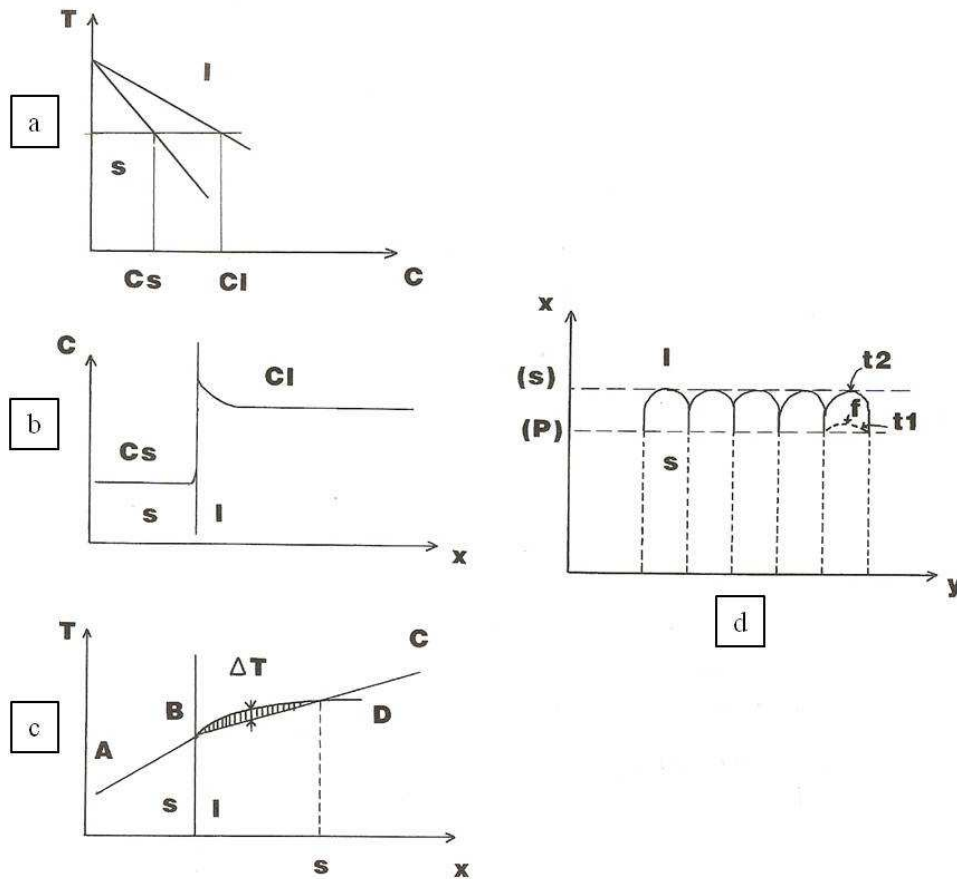


Figure 1-10: Théorie de la digitation (d'après *Guy et Le Coze (1990)*). (a) diagramme température ( $T$ ) en fonction de la concentration en soluté ( $C$ ).  $I$  est le domaine liquide et  $s$  le domaine solide, les courbes représentent le liquidus et le solidus,  $C_s$  et  $C_l$  les concentrations du solide et du liquide à une température donnée. (b) diagramme de la concentration en soluté en fonction de la distance entre le solide et le liquide. Les segments  $AB$  et  $BC$  sont les profils de température imposés par les conditions aux limites et la diffusion thermique. Le segment  $BD$  donne la température du liquide qui correspond à la composition du liquide, variable dans l'espace à cause du rejet de soluté. Le domaine hachuré représente la surfusion. (d) instabilité de l'interface du front de solidification avec  $x$  parallèle à ce front et  $y$  perpendiculaire.  $(P)$  est le plan moyen,  $f$  une irrégularité à un instant  $t_1$  et  $(s)$  limite du plan de l'irrégularité à un instant  $t_2$ .

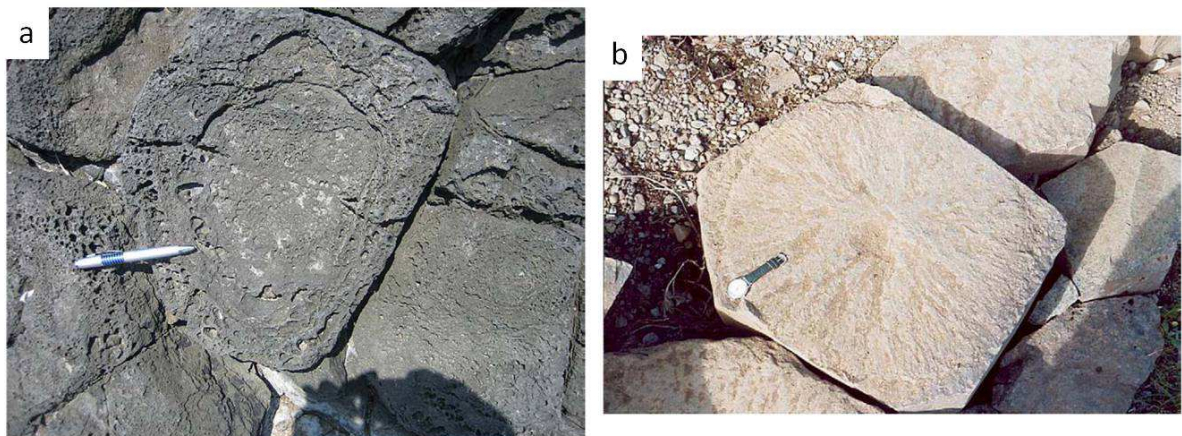


Figure 1-11: Photos de prismes (*Guy, 2010*). (a) distribution de vésicules parallèle aux bords du prisme. (b) structure radiaire partant du centre du prisme vers les bords.

### 3.1. Les études magnétiques

#### 3.1.1. Les études à l'échelle du prisme

De nombreuses études magnétiques sont réalisées sur les roches magmatiques, mais peu se consacrent aux structures prismées. L'une des premières études magnétiques qui évoque la prismation dans les laves est celle de Brown et al. (1964). Ces auteurs utilisent des mesures de susceptibilité magnétique afin de montrer que les colonnes observées dans les basaltes sont bien le résultat de la contraction thermique et non pas de cellules convectives dans le liquide (Lafeber, 1956). Sur des sections de prismes échantillonnés dans une coulée de lave datant du Permien en Australie, Brown et al. (1964) ont carotté d'un bord à l'autre d'un prisme en passant par le centre et en espaçant les échantillons tous les dix centimètres sur des prismes d'environ 2 m de diamètre. L'auteur déduit de ces mesures que la forme de l'ellipsoïde de susceptibilité magnétique, issue de l'orientation des trois axes principaux de susceptibilité, est en moyenne plutôt aplatie (oblate) qu'allongée (prolate) (*cf. Annexe I*) et que l'axe de susceptibilité minimum est groupé autour de la normale au plan que représente la face hexagonale du prisme. L'écoulement de la lave est par conséquent parallèle à cette face. Les grains sont donc alignés selon l'écoulement primaire lors de la mise en place. Il n'y a pas de preuves d'un écoulement vertical quelque soit l'emplacement de l'échantillon dans le prisme, ce qui aurait été nécessaire dans le cas de mouvements convectifs. Les axes maximum et intermédiaires de susceptibilité magnétique sont essentiellement parallèles à la section hexagonale avec une direction aléatoire de l'axe maximum tout le long de la traversée du prisme.

Symons (1967) réalise une étude similaire sur une section de prisme en effectuant un échantillonnage qui part du centre vers les bords dans diverses directions. L'auteur, en plus de mesurer l'anisotropie de susceptibilité magnétique, mesure la densité de chaque échantillon ainsi que la rémanence naturelle, la démagnétisation en courant alternatif, la rémanence thermique et isothermique, réalise des courbes thermomagnétiques, étudie la pétrographie en lame mince, et des analyses sur la composition chimique des magnétites. (*cf. Annexe I*). Il conclut de toutes ces mesures qu'il existe des variations systématiques dans les propriétés magnétiques entre le centre et le bord d'une section de prisme. Ces variations sont reliées à la minéralogie magnétique et concernent, en particulier, les minéraux ferromagnétiques, principaux porteurs de la susceptibilité magnétique. Dans les échantillons étudiés par Symons, le principal porteur du magnétisme est la titanomagnétite dont les variations de composition se font essentiellement en fonction de la teneur en titane, ce qui influence les propriétés magnétiques (Lattard et al. 2006). Par exemple, la température de Curie obtenue par mesure de la susceptibilité en fonction de la température augmente quand la proportion de titane diminue et tend vers la température de la magnétite pure ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) qui est de  $580^\circ\text{C}$ . La température de Curie diminue quand la proportion de titane augmente et tend vers  $110^\circ\text{C}$  pour une fraction proche de 0,6 ( $\text{Fe}_{2,4}\text{Ti}_{0,6}\text{O}_4$ ). Symons trouve des teneurs en titane dans les titanomagnétites en moyenne plus élevées au centre du prisme qu'aux bords. Certains paramètres varient entre le centre et les bords du prisme de manière aléatoire comme la direction de la rémanence naturelle et thermique ou encore des axes de susceptibilité magnétique. Les seuls paramètres à n'avoir aucune variation sont la densité, la taille des grains, l'abondance minéralogique et la composition chimique. Il conclut que la contraction thermique est l'hypothèse la plus plausible et que la formation des colonnes se produit par étape sur un intervalle de température qui correspond à l'hypothèse de la



contraction continue. Cela impliquerait un gradient de composition en oxygène et en titane de la titanomagnétite au cours du refroidissement et expliquerait les variations de propriétés magnétiques. De plus, Symons montre que l'hypothèse que ces variations de composition soient dues à l'altération hydrothermale ou atmosphérique n'est pas tenable du fait du manque de produit d'altération observé dans les lames minces.

Radhakrishnamurty et al. (1971) présentent également une étude magnétique sur une section de prisme en échantillonnant d'un bord à l'autre. Les auteurs utilisent essentiellement des mesures thermomagnétiques et de paramètres d'hystérésis et trouvent également des variations des propriétés magnétiques à travers le prisme. La phase minérale porteuse du magnétisme est différente entre le centre du prisme où l'on trouve des grains de type monodomaine (SD) de maghémite ( $\gamma \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) alors que les échantillons du bord du prisme contiennent des grains SD de magnétite. Les auteurs expliquent cette différence de la façon suivante : la lave commence à refroidir puis forme des cristaux de magnétites de façon uniforme dans toute la coulée, les colonnes ne se développant que plus tard. La température ambiante dans les colonnes est alors suffisante pour permettre l'oxydation des magnétites en maghémite. Des gradients thermiques radiaires se mettent alors en place dans la colonne ce qui permet d'oxyder les magnétites dans les différentes parties de la colonne avec des degrés variables. La température et le taux d'oxydation sont alors plus élevés au centre du prisme par rapport aux bords. Mais d'autres facteurs extérieurs comme la pression d'oxygène ou le taux d'humidité peuvent également intervenir.

Ellwood et Fisk (1977) et Ellwood (1979) proposent des études de la variation de l'anisotropie de susceptibilité magnétique dans des colonnes de basalte d'Islande. Pour les auteurs, l'orientation des grains magnétiques déduite de mesures d'anisotropie de susceptibilité magnétique est essentiellement contrôlée par les contraintes accumulées pendant la solidification du magma. Ces contraintes deviennent importantes après la formation des colonnes qui résultent de la contraction thermique. De telles contraintes pourraient avoir un rôle prédominant sur celui de l'écoulement pour l'alignement des grains.

Urrutia-Fuccuguchi (1982) et Urrutia-Fuccuguchi et al. (1991) concluent de leurs études d'anisotropie de susceptibilité magnétique que le plan de la foliation magnétique (plan défini par les axes de susceptibilité magnétique maximum et intermédiaire) est parallèle à la section de la colonne et concorde avec l'écoulement du magma. La forme de l'ellipsoïde d'anisotropie de susceptibilité magnétique est préférentiellement allongée plutôt qu'aplatie, contrairement aux observations de Brown (1964), ce qui pourrait être provoqué par des contraintes dues à la contraction thermique. Cependant, certains paramètres présentent des variations systématiques liées à la forme des colonnes comme la susceptibilité moyenne  $K_m$ , le degré d'anisotropie  $P = (K1/K3)$  ainsi que les degrés de linéation  $L = (K1/K2)$  et de foliation  $F = (K2/K3)$ , avec  $K1 \geq K2 \geq K3$  les axes principaux de l'ellipsoïde de susceptibilité magnétique. Ces variations peuvent avoir plusieurs origines comme l'effet de compaction dû au poids des colonnes, la croissance cristalline provoquée par la cristallisation tardive, le réalignement des grains dans un second champ de contrainte ou encore l'altération chimique due à l'altération atmosphérique.

### 3.1.2. A l'échelle de la coulée

Un certain nombre de publications font état d'études d'Anisotropie de Susceptibilité Magnétique (ASM) sur des roches magmatiques, essentiellement des granites et des dykes et peu sur les coulées de laves basaltiques. Les études concernant les coulées de lave sont faites principalement dans le but de déterminer le sens de l'écoulement et de préciser la structure interne en relation à l'écoulement (par exemple, Cañón-Tapia et al, 1996,1997 ; Zhu et Shi, 2003, Bascou et al. 2005). Gil-Imaz et al. (2006), à partir de mesures d'ASM réalisées sur un sill andésitique, soulignent le rôle de la contraction thermique liée au refroidissement des laves qui expliquerait le regroupement des axes de susceptibilité  $k_3$ , proches de la direction moyenne de l'axe des colonnes. Pour ces auteurs, les différences de propriétés magnétiques que l'on trouve entre le bord et le centre des prismes sont provoquées par la contraction thermique, ce qui expliquerait l'absence d'une linéation magnétique principale dans la foliation.

## 3.2. Les études géochimiques

### 3.2.1. A l'échelle du prisme

Ellwood et Fisk (1977), dans leur étude à l'échelle du prisme couplent les mesures d'ASM à des analyses chimiques de concentration en terres rares. Le processus de cristallisation fractionnée dû à de petites variations de la vitesse de refroidissement dans le prisme, peut causer des variations minéralogiques et donc de la teneur du magma en terres rares. Les auteurs trouvent des variations de la teneur en Samarium (Sm) ainsi que des variations du paramètre de forme de l'ellipsoïde d'ASM. Les analyses sont réalisées sur deux traversées passant au centre du prisme avec des teneurs en Samarium (Sm) qui varient de 1.90 à 1.36 ppm. Les teneurs les plus élevées en Sm sont regroupées dans des zones bien précises du prisme (*Figure 1-12*). Les auteurs constatent que dans les zones du prisme où les teneurs en Samarium sont les plus élevées, la forme des ellipsoïdes est préférentiellement allongée. Les auteurs concluent que l'allongement des cristaux magnétiques se fait en fonction du mode de refroidissement, étant donné que les concentrations maximum en Samarium sont le reflet de zones qui sont restées le plus longtemps liquides.

### 3.2.1. A l'échelle de la coulée :

Tomkeieff (1940) effectue des analyses de la composition chimique en éléments majeurs sur la Chaussée des Géants en comparant la colonnade et l'entablement. Il conclut que la différence de composition entre ces deux niveaux de la coulée est faible. L'entablement est légèrement plus riche en alcalins et plus pauvre en MgO et CaO et la quantité d'eau y est quasi double par rapport à la colonnade (*Tableau 1- 1*). Tomkeieff interprète ces différences de composition chimique comme étant le reflet de la différenciation qui débute dans la lave liquide et qui consisterait en la diffusion de solution aqueuse riche en éléments alcalins vers la partie supérieure de la coulée et donc vers l'entablement.

Swanson (1967) effectue une étude complète de la coulée basaltique de Yakima de la Tieton River (USA). Les analyses chimiques sur les éléments ne révèlent aucune différence entre les diverses parties de la coulée mais l'auteur observe des variations texturales. L'entablement possède des grains plus fins et contient plus de verre comparé à la colonnade ou à la pseudo-colonnade, ce qui implique



un refroidissement plus rapide. Dans la partie colonnade, la proportion verre + minéraux opaques est de 44.9 % alors que dans l'entablement elle atteint 71.6%.

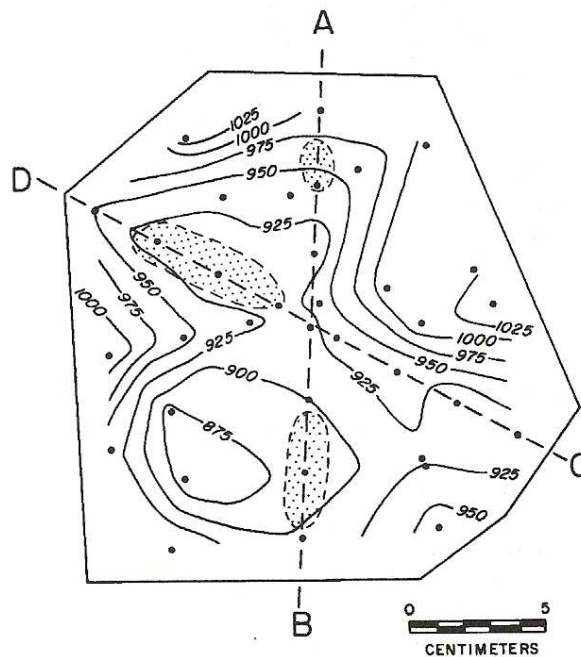


Figure 1-12: Etude d'une section de prisme par *Ellwood et Fisk (1977)*. Les segments AB et DC sont les traversées sur lesquelles ont été analysées les terres rares. Les zones grisées représentent les concentrations maximales en Sm.

### 3.2.2. A l'échelle de la coulée :

Tomkeieff (1940) effectue des analyses de la composition chimique en éléments majeurs sur la Chaussée des Géants en comparant la colonnade et l'entablement. Il conclut que la différence de composition entre ces deux niveaux de la coulée est faible. L'entablement est légèrement plus riche en alcalins et plus pauvre en MgO et CaO et la quantité d'eau y est quasi double par rapport à la colonnade (*Tableau 1- 1*). Tomkeieff interprète ces différences de composition chimique comme étant le reflet de la différenciation qui débute dans la lave liquide et qui consisterait en la diffusion de solution aqueuse riche en éléments alcalins vers la partie supérieure de la coulée et donc vers l'entablement.

Swanson (1967) effectue une étude complète de la coulée basaltique de Yakima de la Tieton River (USA). Les analyses chimiques sur les éléments ne révèlent aucune différence entre les diverses parties de la coulée mais l'auteur observe des variations texturales. L'entablement possède des grains plus fins et contient plus de verre comparé à la colonnade ou à la pseudo-colonnade, ce qui implique un refroidissement plus rapide. Dans la partie colonnade, la proportion verre + minéraux opaques est de 44.9 % alors que dans l'entablement elle atteint 71.6%.

Poids%	Colonnade	Entablement
(Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O)	3,52	4,14
MgO	5,91	4,07
CaO	10,53	9,11
H <sub>2</sub> O	2,16	4,06

Tableau 1- 1 : Composition chimique en éléments majeurs de la colonnade et l'entablement issus de la Chaussée des Géants, d'après Tomkeieff, 1940.

Lyle et Preston (1993) fournissent beaucoup de données géochimiques sur la Chaussée des Géants mais ne font pas la distinction entre les différentes structures prismées. Les auteurs citent seulement les travaux de Long et Wood (1986) et de Degraff et Aydin (1987) sur la pénétration d'eau à partir de la surface et le long des fractures et qui forme l'entablement. Certaines de leurs observations de terrain viennent appuyer cette théorie (présence de pillow lava et de brèches hyaloclastiques à la base des coulées).

## Conclusion

La revue des articles publiées depuis le début des investigations sur la prismation dans les roches magmatiques nous a permis de retracer l'évolution des hypothèses en fonction des connaissances et des nouvelles techniques d'analyse qui sont apparues au cours du temps. Aujourd'hui, l'hypothèse de la contraction thermique reste la plus répandue avec diverses méthodes pour la mettre en évidence comme des modèles thermiques, l'étude des stries à la surface des fractures ou encore l'expérimentation analogique. L'hypothèse de la convection de cellules de magma à l'origine des colonnes a été écartée. Néanmoins, un certain nombre d'auteurs évoquent une convection de fluide, essentiellement de la vapeur d'eau, au niveau des fractures et, qui associée à la conduction, permet un refroidissement plus rapide notamment dans la partie supérieure de la coulée. Une nouvelle théorie est apparue : celle de la digitation par surfusion de constitution, dont les différents arguments sont encore débattus. De nouvelles techniques sont utilisées pour aborder l'origine des structures prismées comme les études magnétiques. Les mesures d'anisotropie de susceptibilité magnétique ont, par exemple, permis d'apporter un nouveau regard sur l'hypothèse de la convection de cellules de magma (Brown, 1964). Cependant les études magnétiques à l'échelle de la coulée et du prisme restent trop peu nombreuses pour établir une cartographie fine des propriétés magnétiques des différents niveaux dans une coulée de lave. Les études géochimiques sont également limitées que ce soit à l'échelle du prisme ou de la coulée. Pourtant nombreuses sont les publications qui accordent que l'entablement possède un système de fractures différent de celui de la colonnade ou de la pseudo-colonnade. Nous devrions alors pouvoir trouver des propriétés spécifiques à chaque niveau. Tomkeieff (1940) met en évidence dans la coulée de la Chaussée des Géants que la quantité d'eau de l'entablement par rapport à la colonnade est plus élevée, or peu d'auteurs ont effectuée cette mesure. Selon la théorie de la digitation (Guy et Le Coze, 1990), certains éléments chimiques devraient être préférentiellement présents au bord des prismes plutôt qu'au centre des prismes. D'où l'intérêt de mieux caractériser les variations géochimiques, texturales et des propriétés magnétiques sur l'ensemble d'une coulée ainsi qu'à l'échelle du prisme.



## Chapitre 2. Contexte géologique des sites d'étude

# Introduction

Au Cénozoïque et au Quaternaire, l'histoire du Massif Central français est marquée par la mise en place de volumineuses formations volcaniques, parmi lesquelles de nombreuses coulées de lave basaltique qui présentent une prismation plus ou moins bien développée. Deux coulées de lave, appartenant au domaine volcanique du Velay, ont été sélectionnées sur la base de critères assurant les meilleures conditions d'étude : âge récent, sens d'écoulement connu, qualité de prismation et de zonation verticale de la prismation. La coulée de La Palisse, près du Lac d'Issarlès, est située en Ardèche, dans la zone sud-est du Velay correspondant au Bas-Vivarais. Il s'agit d'une coulée de lave basaltique de fond de vallée dont le centre d'émission (le Suc de Bauzon) ainsi que le sens d'écoulement sont connus (Berger 1973). La colonnade, l'entablement et la pseudo-colonnade y apparaissent nettement. La coulée de Saint-Arcons-d'Allier est située en Haute-Loire, au nord-ouest du Velay, dans le secteur du Haut-Allier. Cette coulée de lave présente, dans la partie colonnade, de longs prismes dont le diamètre, d'environ 20 cm, permet un prélèvement et un transport aisé des échantillons. Ces deux coulées de lave sont relativement jeunes (50 ka pour La Palisse et 600 ka pour Saint-Arcons-d'Allier), ce qui nous assure de la fraîcheur des échantillons notamment pour les analyses chimiques.

## 1. Contexte géologique des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier

### 1.1. Généralités sur le volcanisme du Velay

La région du Velay est encadrée à l'ouest par la vallée de l'Allier et le haut pays de Margeride et à l'est par la Cévenne vivaroise du Pilat au Gerbier de Jonc et au massif du Tanargue (à 20 km au sud de La Palisse) (*Figure 2-1*). Sa limite sud est dessinée par le plateau ardéchois et sa limite nord par la partie méridionale du plateau granitique du Livradois-Forez (situé au nord de Craponne sur Arzon). Le volcanisme du Velay peut être subdivisé en trois grands secteurs allongés du nord-ouest au sud-est (Mergoïl & Boivin 1993). Situés d'ouest en est, ce sont (*Figure 2-1*) :

- Le plateau du Devès
- Le bassin du Puy
- La haute chaîne du Meygal-Mézenc.

Le *grand plateau basaltique du Devès* nous intéresse particulièrement du fait de la localisation des deux coulées étudiées, La Palisse et Saint-Arcons-d'Allier (*Figure 2-1*). Il s'étend sur plus de 70 km du nord-ouest au sud-est entre le Haut-Allier et le cours supérieur de la Loire. Son altitude est d'environ 1000 m avec un grand nombre (150) (Mergoïl & Boivin, 1993) de cônes de scories basaltiques qui perturbent la surface plane du plateau. Ces appareils volcaniques constituent un alignement d'orientation NW-SE dont le point culminant est à 1421 m (mont Devès). Une activité phréatomagmatique apparaît par des maars, dépressions circulaires remplies par des narces ou tourbières ou par des lacs. La base des coulées du plateau côté ouest est à plus haute altitude que celle située à l'est du plateau.

Dans la vallée de l'Allier comme dans celle de la Loire, les coulées les plus récentes (Pléistocène) sont présentes sur le versant jusqu'au talweg actuel (Monistrol d'Allier, Rocher de Prades...). Dans le cours supérieur de la Loire et le haut plateau ardéchois apparaissent quelques volcans très jeunes qui se rattachent au cycle volcanique du Pléistocène récent du Bas-Vivaraïs (volcans de Cherchemuse, de Bauzon et du Ray-Pic) (*Figure 2-1*).

Le *bassin du Puy*, dont la ville du Puy-en Velay marque l'ombilic à 630 m d'altitude, est un bassin d'effondrement également orienté NW-SE. Comblé dans un premier temps par des sédiments paléogènes, l'extension des sédiments du Cénozoïque déborde largement les limites topographiques actuelles du bassin (Mergoil & Boivin 1993).

Le secteur du *Velay oriental* peut être divisé en trois sous-secteurs bien distincts. Au nord-ouest se situe le *pays des sucs* (le graben de l'Emblavès d'orientation NW-SE), à partir du sud du plateau granitique de Craponne jusqu'aux limites nord du plateau basaltique de Champclause. Cette zone est constituée de reliefs phonolitiques et de petits plateaux basaltiques. Dans la partie médiane du Velay oriental s'étend le haut plateau basaltique de Champclause-Saint-Front-Le Monastier-sur-Gazeille dont l'altitude peut atteindre 1100 à 1200 m. Cette zone présente sur ses bordures ouest et est de belles superpositions de coulées de lave basaltiques (vallée de la Saliouze et de la Rimande à l'est, de la Gazeille et de l'Aupépine à l'ouest). Enfin, au sud-est le *pays des Boutières*, orienté NW-SE et dominé par le mont Mézenc à 1752 m, est également constitué de sucs phonolitiques et de plateaux basaltiques.

Une chronologie des événements volcaniques du Velay (*Figure 2-2*) a été établie par Maury & Varet (1980) et Hodges (1991) à partir d'observations de terrain et d'études géochronologiques. Le volcanisme du Velay a débuté au nord-ouest (fossé de l'Emblavès et le sud du plateau de Craponne) avec des extrusions de phonolite âgées de 13,5 Ma. Ces premières phonolites précèdent l'émission de trachytes subcalcaires porphyriques également restreinte à cette même zone et dont le paroxysme est situé entre 10 et 12 Ma. Les laves du plateau basaltique oriental sont datées de 11 à 7,5 Ma. Les laves différenciées du secteur sud-est sont âgées de 8,5 à 5,7 Ma. Le paroxysme volcanique de la chaîne orientale tous types de laves confondues se situe vers 8 Ma. Les laves différenciées situées au sommet du plateau du Mézenc, de Fay-sur-Lignon, des Estables, du Béage donnent des âges entre 8,6 et 7,6 Ma. Les éruptions postérieures basaltiques se déplacent vers l'ouest et sont âgées de 5,5 à 0,5 Ma. Elles se produisent d'abord dans le bassin du Puy puis forment le plateau du Devès. Durant le Villafranchien, deux paroxysmes sont identifiés : un premier à 2 Ma et un second vers 1,2 Ma. À partir de 0,5 Ma, les éruptions basaltiques gagnent le nord-ouest (Brivadois, maar d'Alleret et volcan des Geizes) et le sud-est (Vivaraïs, volcan de Cherchemuse, vallée du Gage).

En conclusion, les âges du volcanisme de la province vellave évoluent d'abord du nord-ouest au sud-est dans la chaîne orientale différenciée, puis d'est en ouest vers le bassin du Puy, et la vallée de l'Allier. Le paroxysme éruptif général, qui concerne les laves basaltiques, se situe vers 2 Ma (Mergoil & Boivin 1993).

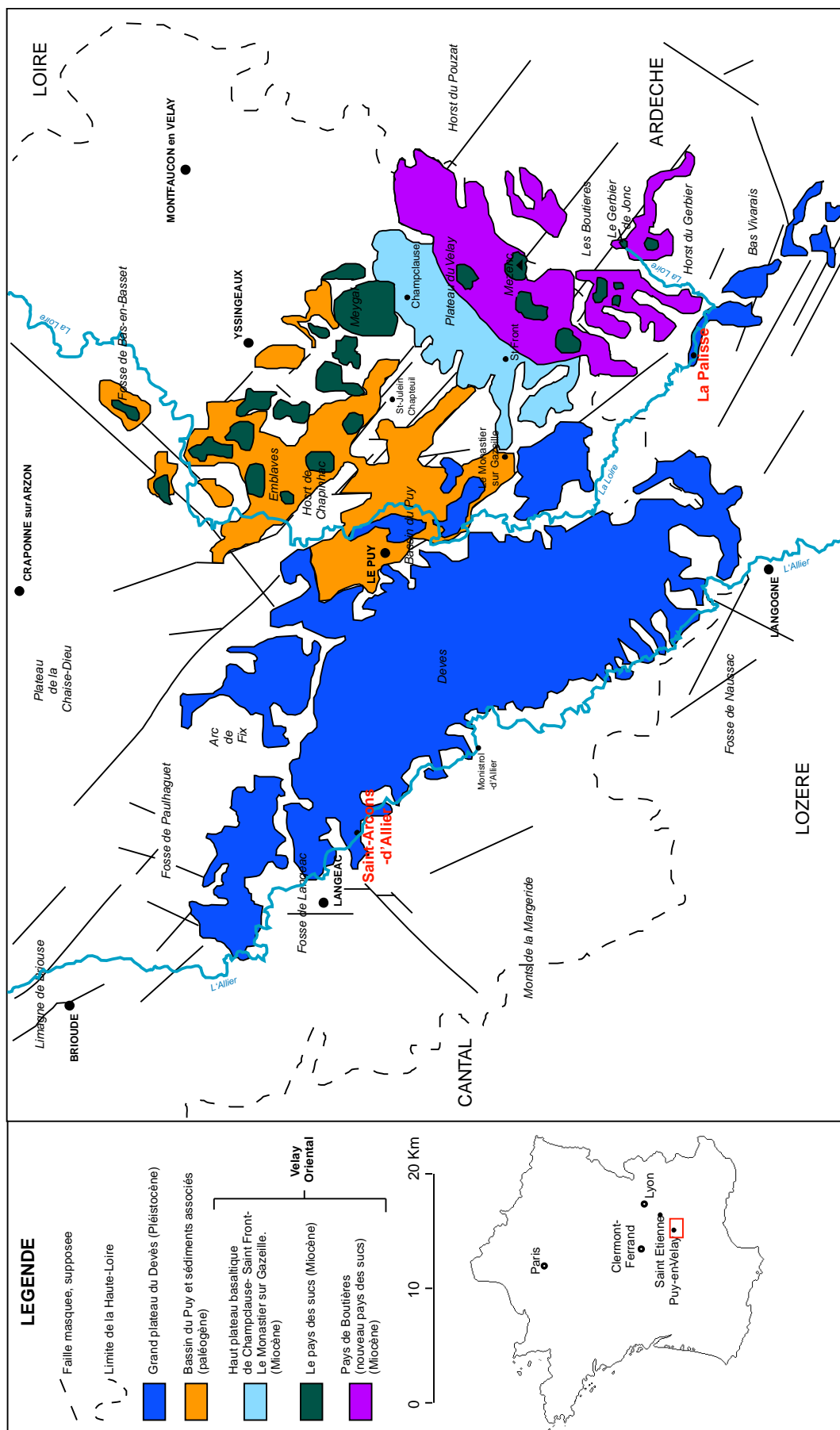


Figure 2-1 : Carte de localisation des grands ensembles volcaniques du Velay (modifié d'après Mergoïl & Boivin 1993)

D'un point de vue pétrographique, les laves basaltiques sont des néphélinites, basanites et hawaïtes regroupées par la suite sous le terme générique de basaltes. Leurs gisements caractéristiques sont des coulées, des filons et plus rarement des necks. Ces roches faiblement porphyriques contiennent des phénocristaux d'olivine à inclusions de spinelle, de clinopyroxène et des microphénocristaux de plagioclase. Des clinopyroxènes et plagioclases peuvent se retrouver parmi les microlites accompagnés de titanomagnétites. La mésostase peut être vitreuse ou cristallisée essentiellement en plagioclases, feldspaths alcalins et feldspathoïdes (Mergoil & Boivin 1993).

Plusieurs types de laves prismées sont retrouvées dans le Velay. Les laves qui ont refroidi dans la partie haute d'une cheminée (neck) présentent une prismation radiale. Les coulées de plateau, peu épaisses, sont grossièrement prismées ou bien ne possèdent pas de structure interne hormis une couche scoriacée superficielle et un niveau discontinu de brèche. Les coulées de vallée ont été canalisées par le réseau hydrographique. Leur épaisseur atteint alors plusieurs dizaines de mètres et leur refroidissement a dû s'étendre sur plusieurs années. Elles possèdent une structuration interne remarquable où se rencontrent sous une carapace superficielle de brèche, l'entablement de faux prismes et la colonnade comme pour la coulée située dans le village de Chilhac.

## 1.2. Le volcanisme du bas Vivarais

La province du Bas Vivarais (sud-est de la région du Velay) est une des zones volcaniques quaternaires du Massif Central français (*Figure 2-2*) (Guérin & Gillot 2007). Elle est constituée d'une quinzaine d'appareils éruptifs et s'étend sur environ 500 km<sup>2</sup> (Rochette et al. 1993). Ce volcanisme est de type phréatomagmatique (maars), précédé ou suivi par des périodes d'activité strombolienne associées à de longues coulées basaltiques dont les laves présentent une très grande homogénéité de composition. Ces laves sont des basaltes alcalins contenant des enclaves abondantes : lherzolites à spinelles, pyroxénites, xénolites de roches crustales (granites, roches métamorphiques ;Berger 1973; 1981) dont les spectres de terres rares suggèrent une origine commune à partir de magmas identiques (Rochette et al. 1993). Pour ces auteurs, l'absence de laves différenciées dans le Bas-Vivarais peut s'expliquer par un faible temps de résidence du magma dans la croûte. Ce type de volcanisme intracontinental est comparable au volcanisme du nord-est de l'Espagne (Cebriá et al. 2000).

Selon Berger (1973), les appareils volcaniques du Bas-Vivarais (la caldeira de la Vestide du Pal, les volcans du Bauzon, du Ray Pic, du Souilhot, du Pic de l'Etoile, la Gravenne de Montpezat et la Coupe d'Aizac) (*Figure 2-3*) ont été de type strombolien pendant toute ou une partie de leur existence. Le Suc de Bauzon est le dernier d'une série de quatre appareils avec la Coupe de Jaujac, le Pic de l'Etoile, et la Coupe d'Aizac. Tous ces appareils sont exclusivement stromboliens et tardivement égueulés par une coulée basaltique de vallée. Certaines particularités peuvent cependant être observées comme la partie interne du cône de la Gravenne de Thueyts constituée quasi exclusivement de scories, ou encore des laves cordées et des cheveux de Pelé au volcan de Souilhol.

Une chronologie des formations volcaniques du Bas-Vivarais basée sur une étude du paléomagnétisme couplé à des datations absolues au <sup>14</sup>C a été proposée par Berger et al (1975). Deux phases éruptives ont été mises en évidence: une première phase à plus de 35000 ans qui concerne la



coulée du Suc de Bauzon, du Pic de l'Etoile et de la Coupe d'Aizac et les coulées les plus anciennes de la Gravenne de Montpezat et une seconde phase éruptive datée à 11770 ans +/- 270 ans qui concerne le volcan de Souilhol, le volcan du Chambon, la Coupe de Jaujac, le Gravenne de Thueyts et la coulée la plus récente de la Gravenne de Montpezat. Cependant, les observations de terrain comme la fraîcheur des roches issues du Suc de Bauzon sont en contradiction avec la première phase éruptive.

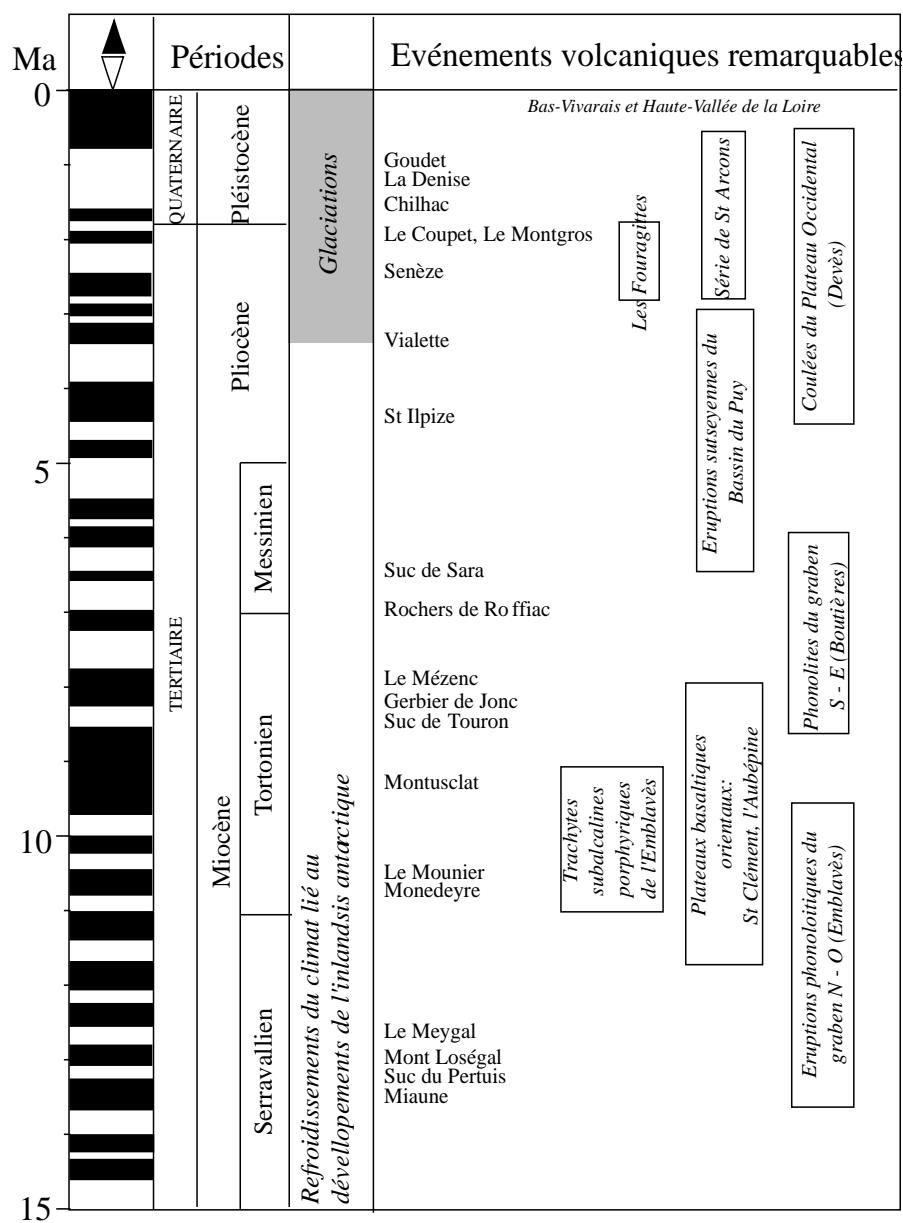


Figure 2-2 : Place des événements volcaniques remarquables du Velay au Cénozoïque (Mergoïl & Boivin 1993)

La chronologie des événements du Bas-Vivaraïs a été récemment réévaluée par Guérin et Gillot (2007), qui ont réalisé des études par thermoluminescence permettant d'attribuer avec une précision raisonnable un âge aux périodes d'activité, comparées aux méthodes de datation radiométriques classiques (K-Ar, <sup>14</sup>C). Les résultats obtenus avec la datation par thermoluminescence

permettent de distinguer trois phases d'activité de courte durée : 45 400 +/- 3200 ans, 78 800 +/- 5300 ans et 166 000 +/- 15 000 ans. Cette province volcanique serait donc constituée de trois périodes d'activité distinctes correspondant chacune à la mise en place de trois à six volcans. Ce volcanisme basaltique possède des récurrences très longues : de 90000 ans entre la phase la plus ancienne et la phase intermédiaire, 30000 ans entre les deux dernières phases et aucune activité depuis 45000 ans. Guérin et Gillot (2007) datent le volcan du Pic de l'Etoile est à 83000 +/- 9200 ans, la Gravenne de Montpezat à 81000 +/- 12000 ans, le volcan du Pay Pic à 77000 +/- 9900 ans et la caldeira de la Vestide du Pal à 47300 +/- 5 300 ans. Sans avoir de datation absolue sur la coulée de la Palisse, ces auteurs placent la coulée du Suc de Bauzon dans la seconde phase éruptive situé à 78800 +/- 5300 ans, en se basant sur les études antérieures (Berger 1981; Berger et al. 1975; Miallier et al. 1991).

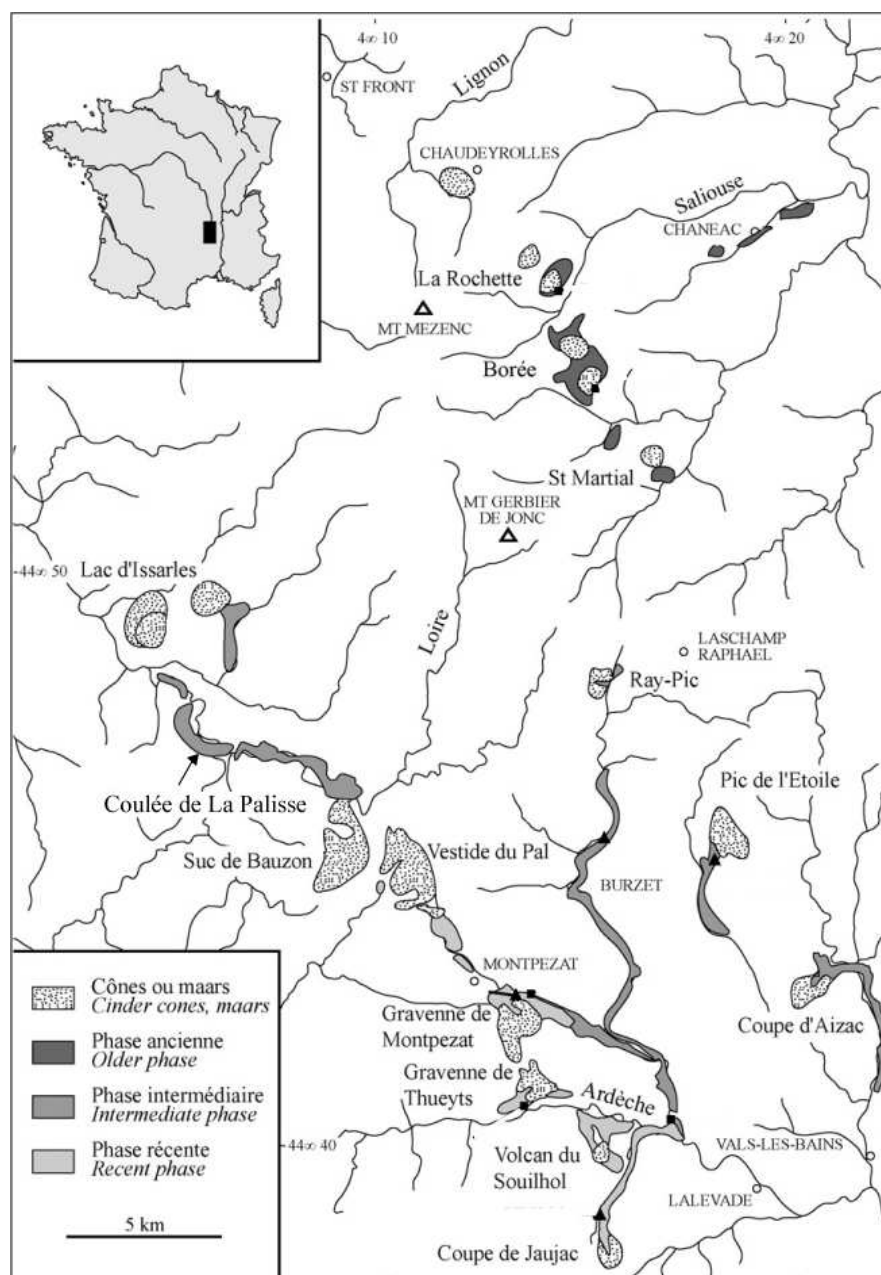


Figure 2-3 : Carte schématique du volcanisme récent du bas Vivarais modifiée d'après Guérin et Gillot, 2007.

### 1.3. Le volcanisme du Haut-Allier.

Le volcanisme du Haut-Allier (nord-ouest de la région du Velay) date de la fin du Cénozoïque. Situé sur le plateau du Devès et au nord de la Margeride, il a débuté il y a 6 Ma et s'est poursuivi jusqu'à une époque récente (0,6 Ma) avec émission et superposition de coulées basaltiques, création de maars et édification de cônes stromboliens (Cantagrel & Prévot 1971; Bellon & Gibert 1983; Fouris 1989).

Le plateau du Devès possède une morphologie peu érodée grâce à ces formations volcaniques récentes (0,6- 3 Ma) et à son installation sur un socle cristallin résistant (Boivin 1982) (*Figure 2-4*). Ce plateau est encadré par la Loire à l'est et par l'Allier à l'ouest et il couvre une surface d'environ 50 km de long et de 15 km de large. Les dimensions de la zone volcanique atteignent 90 km de long et 30 km de large incluant le Brivadois, la région de Paulhaguet, d'Allègre, d'Alleyrac, de Langogne et d'Issarlès-Peyrebeille. L'altitude maximum du plateau est de 1421 m (Mont Devès) mais elle se situe en moyenne vers 1000 m. L'allongement principal de la chaîne est NNW-SSE.

Normand (1973) estime que 90% des formations volcaniques du Devès sont des coulées de lave basaltique. Il distingue deux grands types de coulées : les coulées de plateau et les coulées de vallée. Les coulées de plateau sont décrites comme étant un ensemble de laves élevées topographiquement, assez longues (jusqu'à plusieurs kilomètres) et assez larges, très proches les unes des autres formant ainsi un plateau uniforme. Elles doivent cependant être distinguées des basaltes de plateau de type « trapps » (Deccan) dont les dimensions sont largement plus importantes. Ces coulées de « plateau » sont de type « aa » et possèdent une épaisseur de quelques mètres, la superposition de ces coulées pouvant atteindre 50 à 60 m (Boivin 1982). La prismation de ces coulées est régulière et se présente souvent sur un seul niveau, n'apparaissant que dans les coulées d'épaisseur supérieure à 10 m. Cela contraste avec les coulées de vallée dont Normand (1973) décrit une prismation particulière sur deux niveaux. Ce dernier reprend les conclusions de Tomkeieff (1940) sur la vitesse de refroidissement qui, étant variable à travers la coulée, délimite trois zones de prismation:

- Les prismes de la base, qui sont massifs et bien développés ;
- Les prismes intermédiaires, bien développés mais plus fins et très allongés ;
- Les prismes du sommet, de taille variable et d'orientation aléatoire.

Les caractéristiques des coulées de vallée, selon Normand (1973), sont : des prismes sommitaux de grande taille (10 m d'épaisseur), des coulées généralement courtes (une centaine de mètres) et d'une épaisseur importante (environ 60 m). Boivin (1982) précise que ces coulées sont également particulières par leur entablement de faux prismes surmontant une colonnade très régulière et une pseudo-colonnade au sommet de la coulée. L'épaisseur importante de ces coulées découle du fait qu'un grand volume de lave est confiné dans un espace restreint comme les vallées mais aussi d'autres types de dépression tel les maars (Boivin 1982). Ces laves, ne manifestant aucun signe de dynamisme explosif, sont décrites comme ayant une fluidité au point de sortie suffisante pour s'étendre loin de l'évent. Pour Boivin (1982), la pseudo-colonnade et la colonnade sont souvent

fortement cristallisées avec une mésostase composée de feldspaths alcalins et de feldspathoïdes avec du verre en faible quantité. En revanche, l'entablement, qui représente généralement 2/3 de la coulée, évoque de par ses caractéristiques un refroidissement rapide avec des laves contenant couramment 30% de verre brun-violacé et des cristaux ayant des faciès squelettiques. D'après Kieffer (1969) la zone de l'entablement est restée tardivement liquide, continuant à se déplacer sous la croute épaisse que forme la pseudo-colonnade au moment où la base cristallise. Il suppose que la lave restée plus longtemps liquide s'oxyde d'avantage, ce qui perturbe la cristallisation. Or c'est dans ce niveau que l'on mesure les rapports  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  les plus faibles (Boivin 1982), les minéraux opaques ne présentant pas de trace d'oxydation plus importante.

L'âge des coulées du Devès est essentiellement Villafranchien et concentré entre 2,7 Ma et 0,6 Ma (Bellon & Gibert 1983). L'activité importante de cette époque masque vraisemblablement la plupart des premières manifestations volcaniques de cette province, datant d'environ 6 Ma. A Saint-Arcons d'Allier, la dernière coulée date de 0,6 Ma, elle est donc la coulée la plus récente du plateau du Devès (Cantagrel & Prévot 1971).

L'étude pétrographique des laves du Devès montre qu'il s'agit de basaltes alcalins sodiques peu différenciés provenant directement du manteau supérieur (Boivin 1982). En général, les laves comportent des phénocristaux de clinopyroxène et d'olivine, des microlithes d'olivine, de clinopyroxène, de plagioclase et d'oxyde de Fe-Ti (Fouris 1989). Certaines laves possèdent également des mégacristaux de pyroxène ou d'amphibole (plus d'un centimètre de long). De nombreuses enclaves de péridotite, de socle (gneiss ou granite) ou de roches basiques sont également présentes.

Trois différents types de produits éruptifs peuvent être identifiés sur la chaîne du Devès (Fouris 1989) :

- Les *coulées* dont la description est présentée dans le paragraphe précédent.
- Les cônes de scories.
- Les *appareils hydro-magmatiques* qui indiquent un dynamisme explosif de type maar. Les cratères sont alors de forme circulaire bordés par un croissant de projections. Si l'éruption est subaquatique, l'activité est de type surtseyen ce qui provoque la vaporisation de l'eau et la fragmentation des laves.

La géochronologie du Devès a été détaillée par Fouris (1989) par des datations K-Ar qui montrent un étalement de l'âge du Devès plus important que celui décrit auparavant (Cantagrel & Prévot, 1971 ; Carbonnel et al, 1973, Boivin 1982 ; Bellon & Gibert, 1983). Le paroxysme du volcanisme se situerait entre 3 et 0.6 Ma avec des formations plus anciennes (6,3 Ma pour Saint-Roch près de Langeac).

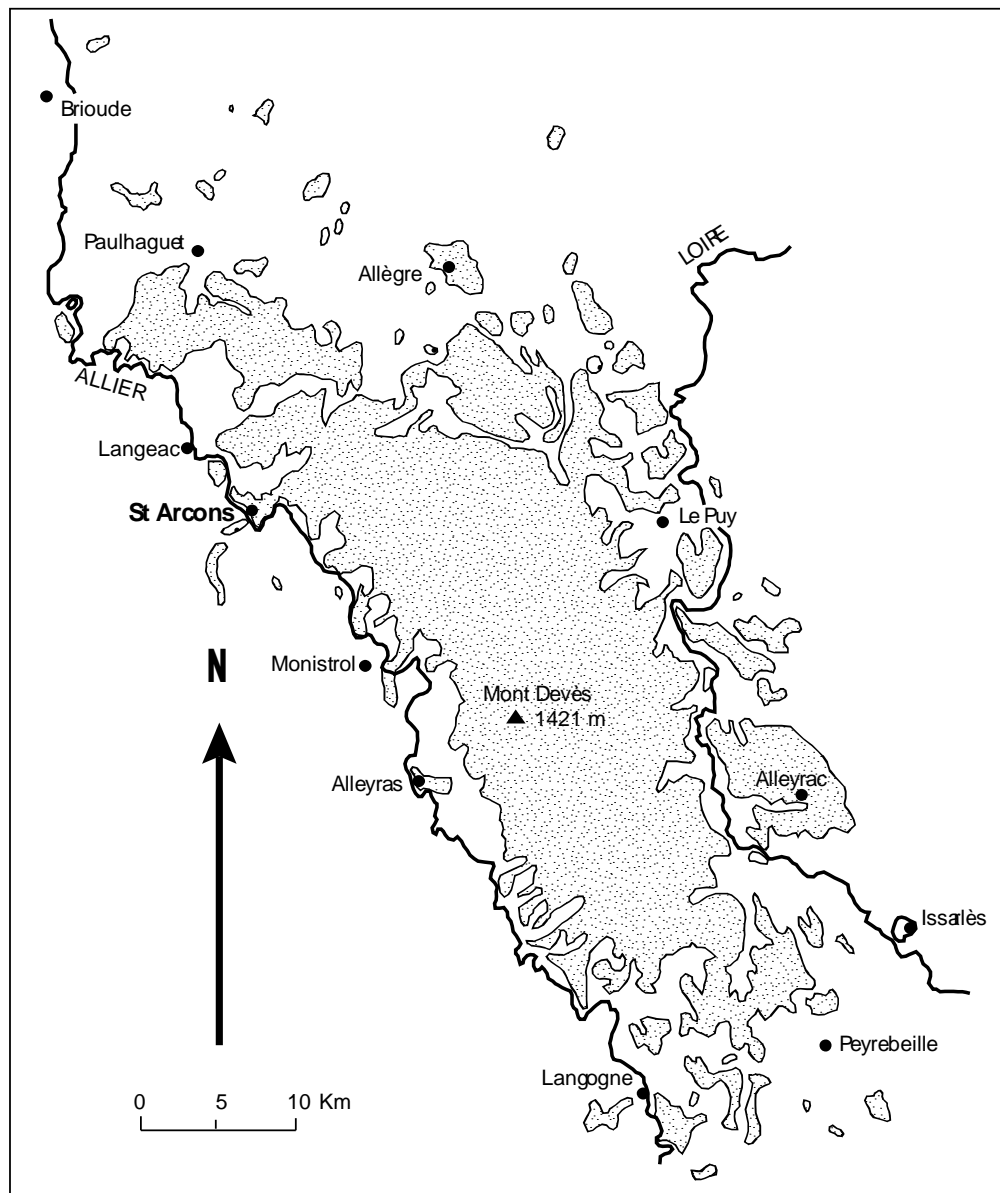


Figure 2-4 : Schéma du plateau du Devès d'après Boivin, 1982.

## 2. Études de terrain sur la coulée de La Palisse (Ardèche)

### 2.1. Description de la coulée de La Palisse

La coulée de La Palisse est la dernière coulée de lave basaltique issue du Suc de Bauzon. Une description précise des volcans du Bauzon a été proposée par Berger (1973). Il distingue quatre unités constituant les volcans du Bauzon (*Figure 2-5*) :

- Le volcan de Narçon
- Le volcan de la Vestide du Barbonnet
- Le cône de la Serre de Reboul
- Le cratère et la coulée du Suc de Bauzon.

Le volcan de Narçon situé immédiatement au sud de la N536 s'élève d'une trentaine de mètres au-dessus du socle à une altitude de 1282 m. Il est essentiellement constitué de projections de toutes tailles (mal classées). Les scories sont abondantes sur le flanc sud et mélangées avec des bombes et des fragments de basaltes centimétriques. Des bombes de grande taille (de l'ordre du mètre) abondent dans le cœur du volcan.

Le volcan de la Vestide du Barbonnet est situé à moins d'une centaine de mètres au nord du cratère de Narçon. Son sommet (1326 m d'altitude) domine le socle de 30 à 40 m. Il est essentiellement constitué de scories et de quelques bombes ainsi que de blocs de basalte vésiculés.

Le cône de la Serre de Reboul au sud du Pic de Bauzon, culmine à 1344 m et présente peu d'affleurements

Le *Suc de Bauzon* et sa coulée ont fait l'objet d'une description plus précise notamment par Bozon (1963) qui précise que le Suc de Bauzon culmine à 200 m au-dessus du socle avec un cratère fortement égueulé vers l'ouest. Berger (1973) complète cette description en apportant des précisions sur les dimensions du volcan : diamètre du cratère de 430 m au sommet avec une profondeur de cratère de 150 mètres. Il décrit le cône comme étant constitué d'une alternance irrégulière de scories, de blocs scoriacés, de bombes fuselées et de petites coulées de quelques décimètres à quelques mètres de basalte souvent vésiculé et parfois massif. Une coulée de basalte massif de 7 à 10 mètres d'épaisseur située près du sommet serait antérieure à la coulée principale qui matérialise un débordement du lac de lave occupant alors le cœur du cratère. Le Suc de Bauzon, égueulé vers l'ouest-nord-ouest, constitue le point de sortie d'une masse importante de basalte, tout d'abord arrêtée à l'ouest par le socle qui affleure à Champ Latier puis s'orientant vers le nord pour atteindre la Loire à environ 500 m à l'aval de Rieutord. La coulée est déviée une seconde fois par la falaise à l'aval de Rieutord, en rive droite et affleure en continu jusqu'au barrage de La Palisse au-delà duquel elle est morcelée. Cette coulée, constituée de basalte massif, possède une longueur totale de 7,5 km et une puissance maximum proche de 40 m. La base de la colonnade épouse parfaitement le profil des épontes alors que la limite supérieure est quasiment plane.

Berger (1973) donne une chronologie de la construction de ces 4 appareils volcaniques en utilisant l'étude de terrain ainsi que la forme des enclaves contenues dans les différents produits volcaniques issus de chaque appareil. Il en déduit que les quatre appareils se succèdent en commençant au sud avec le volcan de Narçon vers le nord et se termine avec le Suc de Bauzon.

Au niveau du Suc de Bauzon, trois types pétrographiques peuvent être distingués (Berger 1973) :

- Au sommet, apparaissent des scories de basalte parfaitement cristallisé de teinte rouge brique (faciès oxydé de type « cœur de cône »). Ce faciès basaltique contient des phénocristaux d'olivine iddingsitisée, des phénocristaux zonés d'augite à macle en sablier ainsi que d'abondants microcristaux automorphes d'augite et d'olivine. La mésostase est microlitique, avec des microlites de plagioclase et de titanomagnétite au sein d'un verre interstitiel d'aspect vermiculé.
- La coulée de lave située près du sommet est constituée un basalte massif gris clair en patine et gris foncé en cassure. Il contient de nombreux mégacristaux d'olivine (jusqu'à 4

mm avec une taille moyenne de 2 mm). Les olivines présentent des golfes de corrosion et coexistent avec des olivines de nodule de périclote qui sont xénomorphes et qui possèdent des macles mécaniques. Les phénocristaux d'augite sont moins abondants que les olivines et certaines sont zonées. La mésostase contient des microlites d'augite, d'olivine et des plagioclases ainsi que du verre interstitiel.

Le basalte de la coulée de la Loire est extrêmement massif. Les phénocristaux sont exclusivement des olivines et des augites avec une large prédominance pour les olivines. Ces dernières sont très peu altérées, automorphes avec des golfes de corrosion. Certaines montrent des macles mécaniques qui indiquent leur origine mantellique. Les augites sont peu abondantes et fréquemment zonées. Elles peuvent se développer autour d'un nucleus d'orthopyroxène et sont alors zonées et peuvent présenter la pseudo-macle en sablier. Les microcristaux ne présentent aucune particularité et le verre tapisse toujours le fond de la lame mince (Berger 1973).

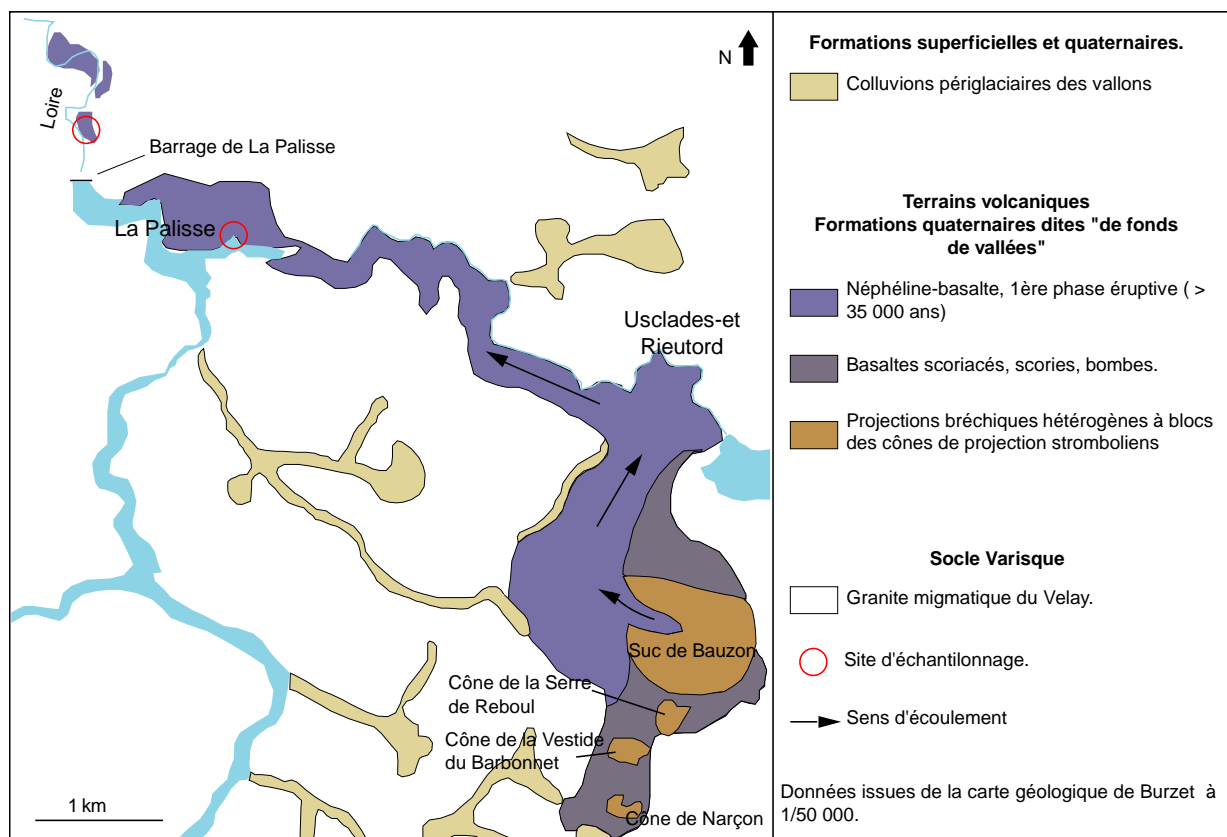


Figure 2-5 : Carte géologique de la coulée de La Palisse modifiée d'après Bambier et al., 1985.

## 2.2. Site d'échantillonnage du barrage de la Palisse (site 1)

Un premier site d'échantillonnage a été sélectionné à proximité du barrage de La Palisse. Ce site met à l'affleurement la colonnade et l'entablement de la coulée (Figure 2-6). Une première série d'échantillonnage a été effectuée le long d'un transect d'environ 10 m de long partant de la colonnade (localisation GPS N°1, Tableau 2- 1) et en remontant le long de la route jusqu'à

l'entablement (localisation GPS N°2, *Tableau 2- 1*). Ce transect permet d'échantillonner de manière régulière la colonnade à la base, et l'entablement qui constitue le niveau intermédiaire de la coulée. Une deuxième série d'échantillonnage a été effectuée dans la colonnade à proximité de l'ancien pont (localisation GPS N°3, *Tableau 2- 1*), *Figure 2-7*.

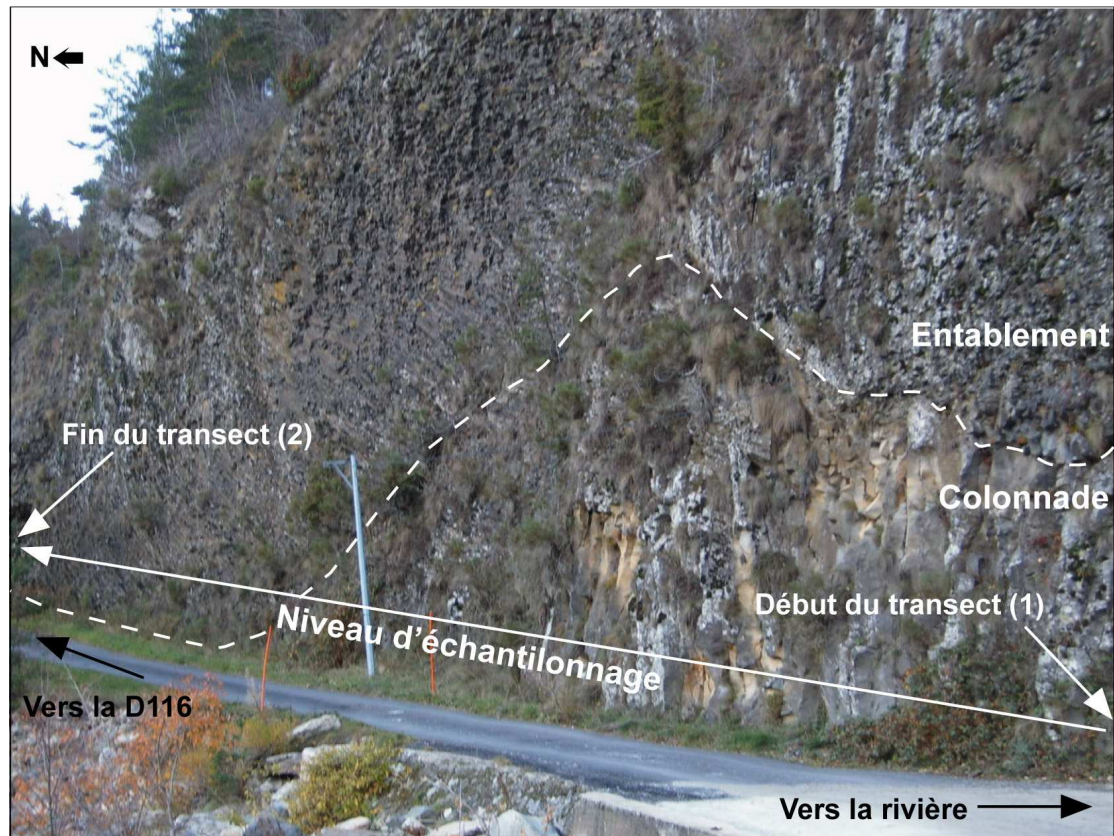


Figure 2-6 : Localisation de la 1<sup>ère</sup> série d'échantillonnage, site de La Palisse- Barrage.

N° série d'échantillonnage	Description	Coordonnées GPS		UTM 31N (Km)	
		Latitude	Longitude	X	Y
La Palisse Barrage					
1	Début du transect, colonnade	44° 47,38'	4° 05,33'	586,130	4960,162
2	Fin transect,	44° 47,42'	4° 05,33'	586,129	4960,236
3	Colonnade, à proximité de l'ancien pont	44° 47,34'	4° 05,36'	586,171	4960,089
La Palisse Village					
4	Haut du chemin	44° 46,88'	4° 06,32'	587,448	4959,254
Saint-Arcons-d'Allier					
5	Série de Saint- Arcons	45° 03,94'	3° 33,63'	544,125	4990,398

Tableau 2- 1: Coordonnées GPS et UTM (Universal Transverse Mercator) 31N des sites d'échantillonnage. Ellipsoïde de référence WGS84.



Cette deuxième série d'échantillonnage permet d'avoir accès à la section des prismes de la colonnade (*Figure 2-8*). Les prismes ont un diamètre d'environ 30 cm, sont verticaux et présentent souvent une structure radiée qui part du centre du prisme vers les bords (*Figure 2-9*). Contrairement à la colonnade, l'entablement apparaît comme constitué de petits prismes disposés de manière aléatoire. Toutefois, une distribution des prismes en structures concentriques ressort à l'échelle de l'affleurement (*Figure 2-10*). En se déplaçant vers le Sud (en direction du barrage) les prismes de la colonnade (localisation GPS N°3, *Tableau 2- 1*) deviennent sensiblement différents : ils sont en moyenne plus petits (20 cm de diamètre) et sont inclinés (*Figure 2-11*). Le passage entre la colonnade et l'entablement est progressif (*Figure 2-12*).

Le site d'échantillonnage de La Palisse barrage permet d'observer des affleurements où le passage de la colonnade à l'entablement est bien visible. Il permet également d'avoir accès à la section des prismes de la colonnade, offrant ainsi la possibilité d'effectuer des études à l'échelle d'un prisme isolé. En revanche, le site de la Palisse barrage ne donne pas accès à la pseudo-colonnade d'où le choix du second site d'échantillonnage de la Palisse village.

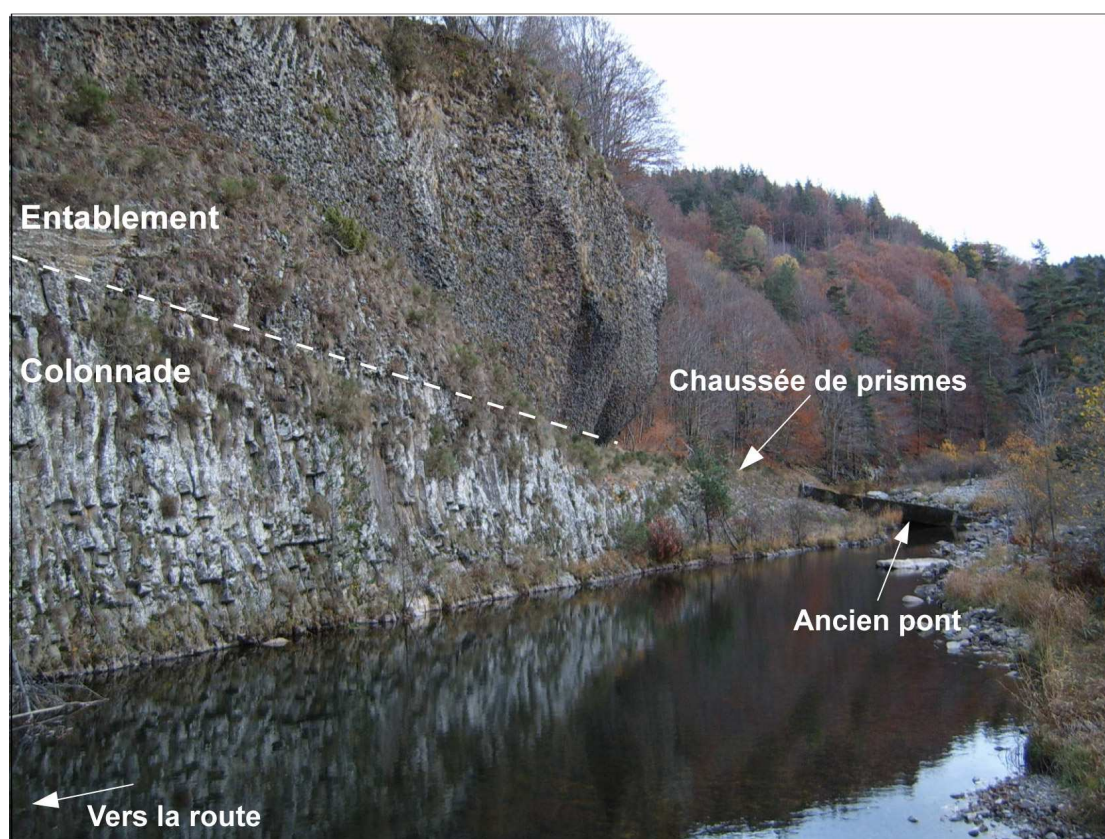


Figure 2-7 : Localisation de la 2<sup>ème</sup> série d'échantillonnage, site de La Palisse- Barrage



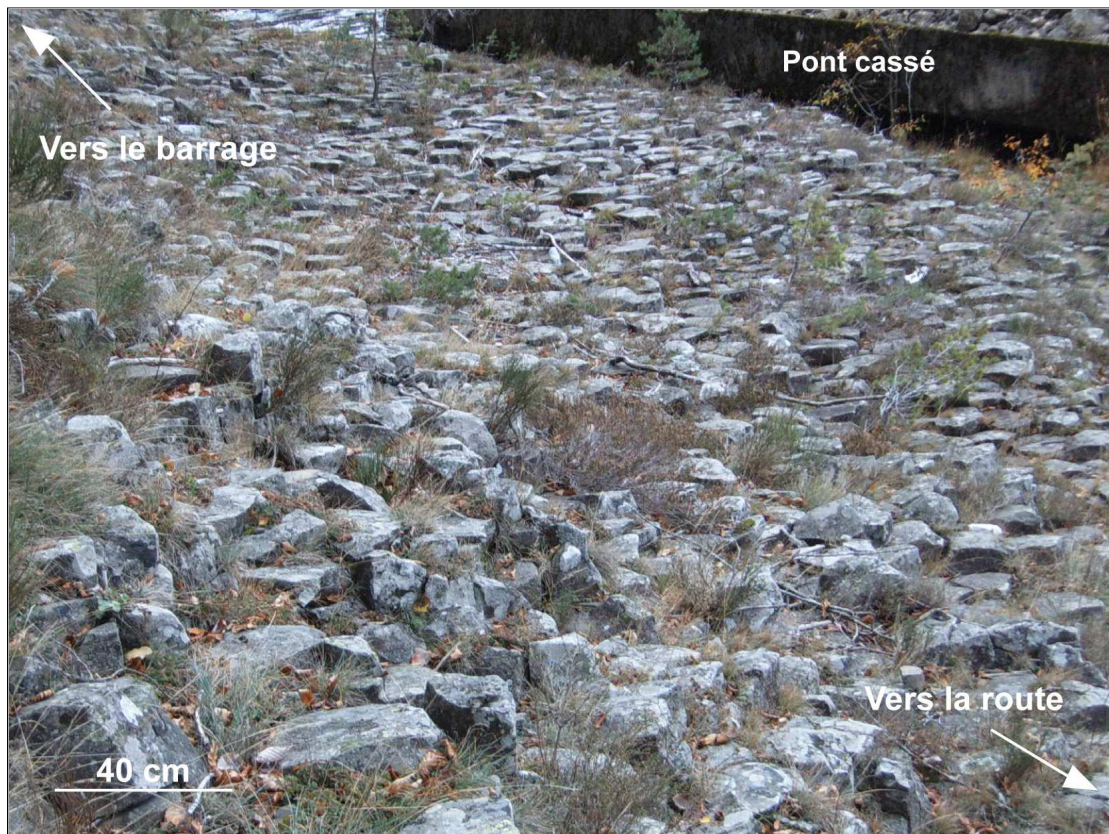


Figure 2-8 : « Chaussée des Géants », section des prismes issus de la colonnade, La Palisse barrage.

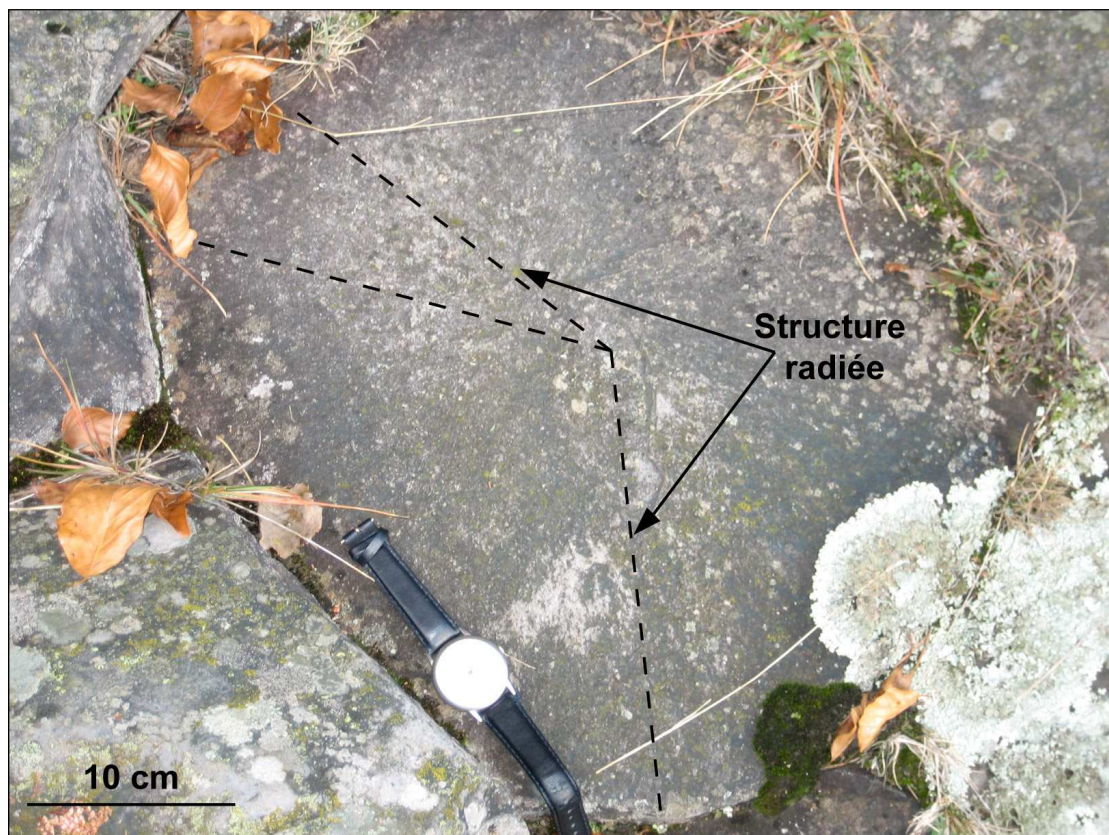


Figure 2-9 : Section de prisme de la colonnade avec observation d'une structure radiaire, La Palisse barrage.





Figure 2-10 : Structures concentriques observées dans l'entablement, La Palisse barrage.



Figure 2-11 : La palisse barrage, prismes le long de la rivière en direction du barrage (localisation GPS N°3).



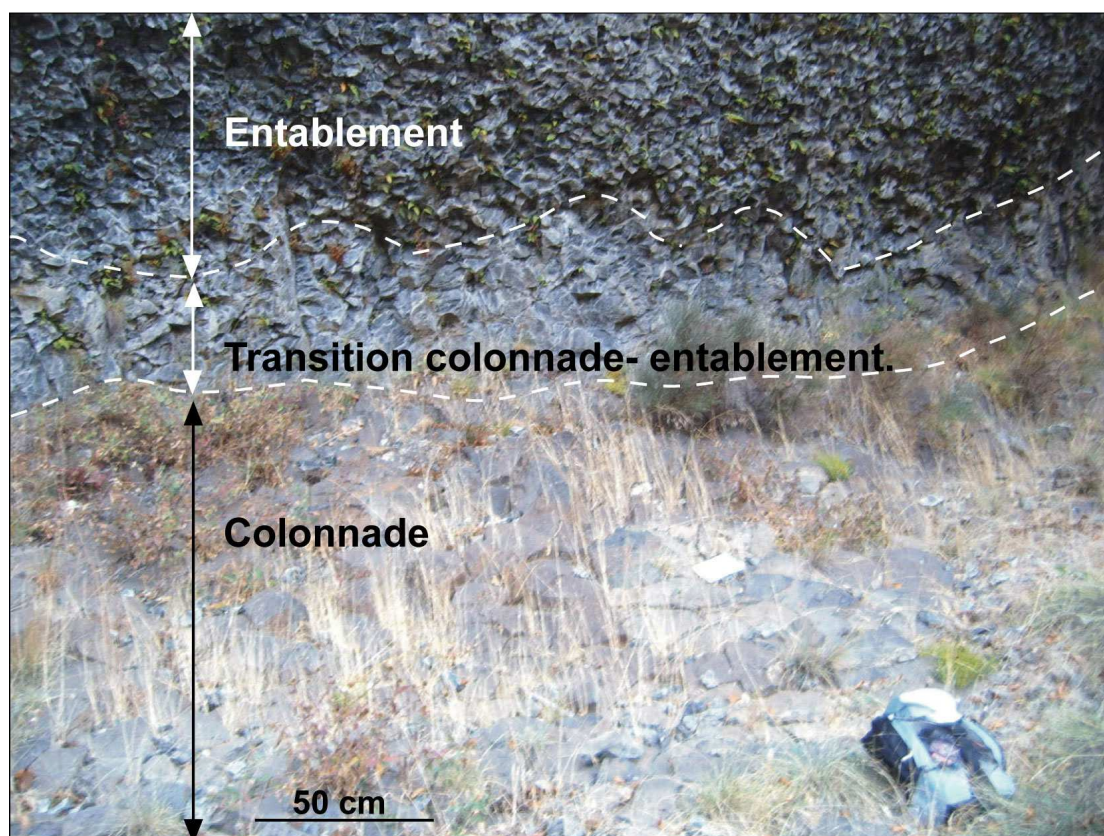


Figure 2-12 : Passage entre la colonnade et l'entablement de la coulée de La Palisse, site du barrage.

### 2.3. Site d'échantillonnage « La Palisse village » (site 2)

Le deuxième site d'échantillonnage se situe au niveau du village même de La Palisse en direction d'Usclade et Rieutord sur la D 160 (*Figure 2-5*). Les premiers affleurements de la coulée (*Figure 2-13*) sont déjà visibles à proximité de la route. Il s'agit de prismes plus ou moins bien définis, évoquant la pseudo-colonnade. Le point le plus élevé du chemin est à une altitude d'environ 1020 m (localisation GPS N°4, *Tableau 2- 1*). L'affleurement le plus bas, en bordure de la Loire (1014 m) est différent par rapport à ce qui est observé sur le site de la Palisse barrage. Un niveau présentant des plans de fractures recoupant la direction d'allongement des prismes avec une direction NNW et un pendage de 50° N (« zone à débit planaire ») est observé (*Figure 2-14 et Figure 2-15*). Sur ce même affleurement (*Figure 2-14*) l'entablement semblable à celui du site du barrage, apparaît dans la continuité de la zone à débit planaire. Cette alternance entre la zone à débit planaire et l'entablement se retrouve le long de la Loire en direction de l'Est (*Figure 2-16*), où l'entablement est alors entièrement remplacé par des plans de fracture. En revanche, le long de la Loire, des affleurements permettent l'observation de la colonnade à la base, des plans horizontaux et de l'entablement au sommet (*Figure 2-17*). La lave sur le site de La Palisse village est généralement plus vésiculée que sur le premier site. Des stries sur les faces des prismes dans la colonnade sont observées au niveau de la rivière (*Figure 2-18*). En continuant à longer la Loire en direction de l'est, des prismes identiques à ceux du site du barrage (*Figure 2-11 Figure 2-19*) apparaissent, avec des sections de prismes de 20 cm inclinées vers la rivière.



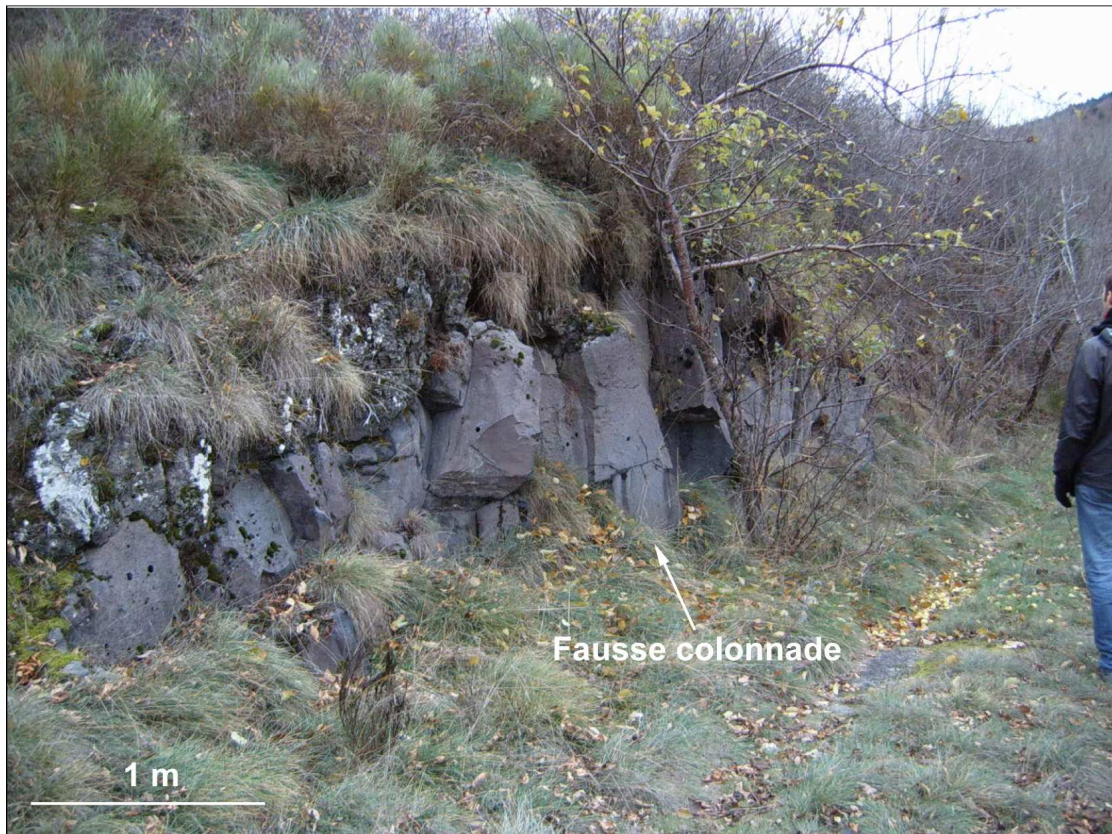


Figure 2-13 : Pseudo-colonnade de la coulée de La Palisse, La Palisse village.

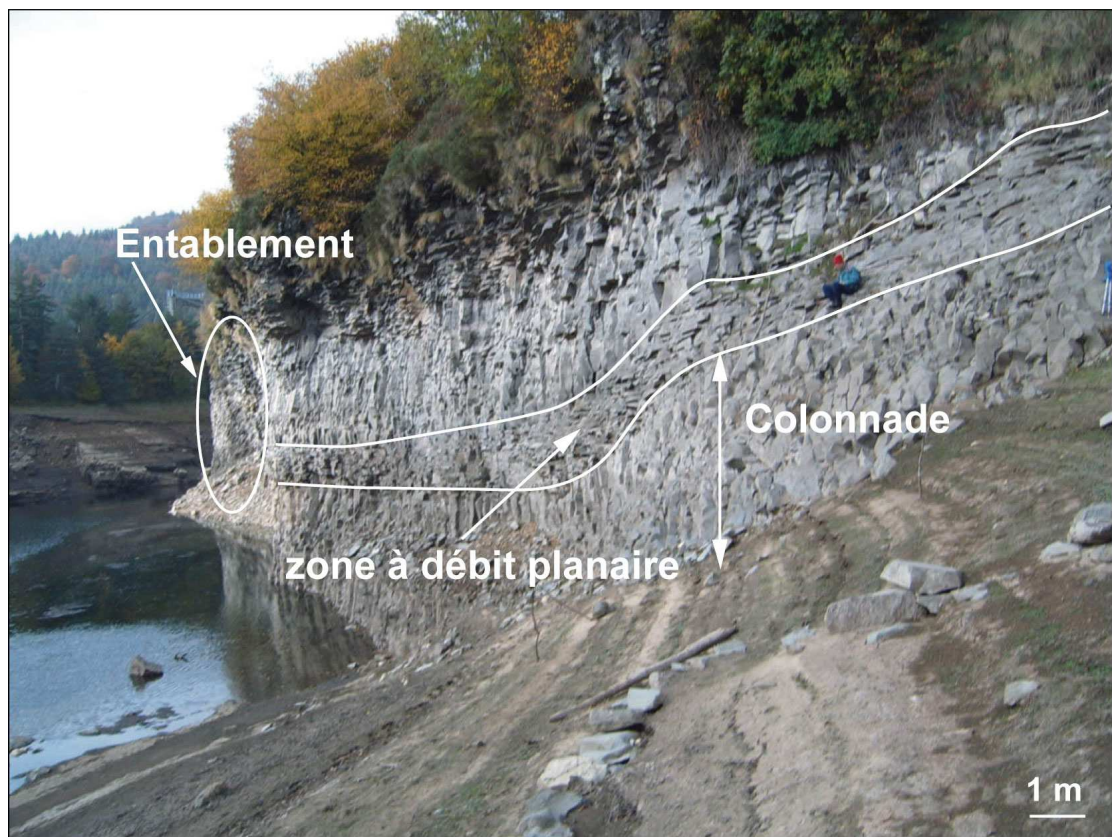


Figure 2-14 : Affleurement au bord de la rivière avec observation de la zone à débit planaire, La Palisse village. L'entablement tel qu'il est décrit pour le site de La Palisse barrage est également observé dans le prolongement de cet affleurement.





Figure 2-15 : Zone à débit planaire en bordure de la Loire, la Palisse village

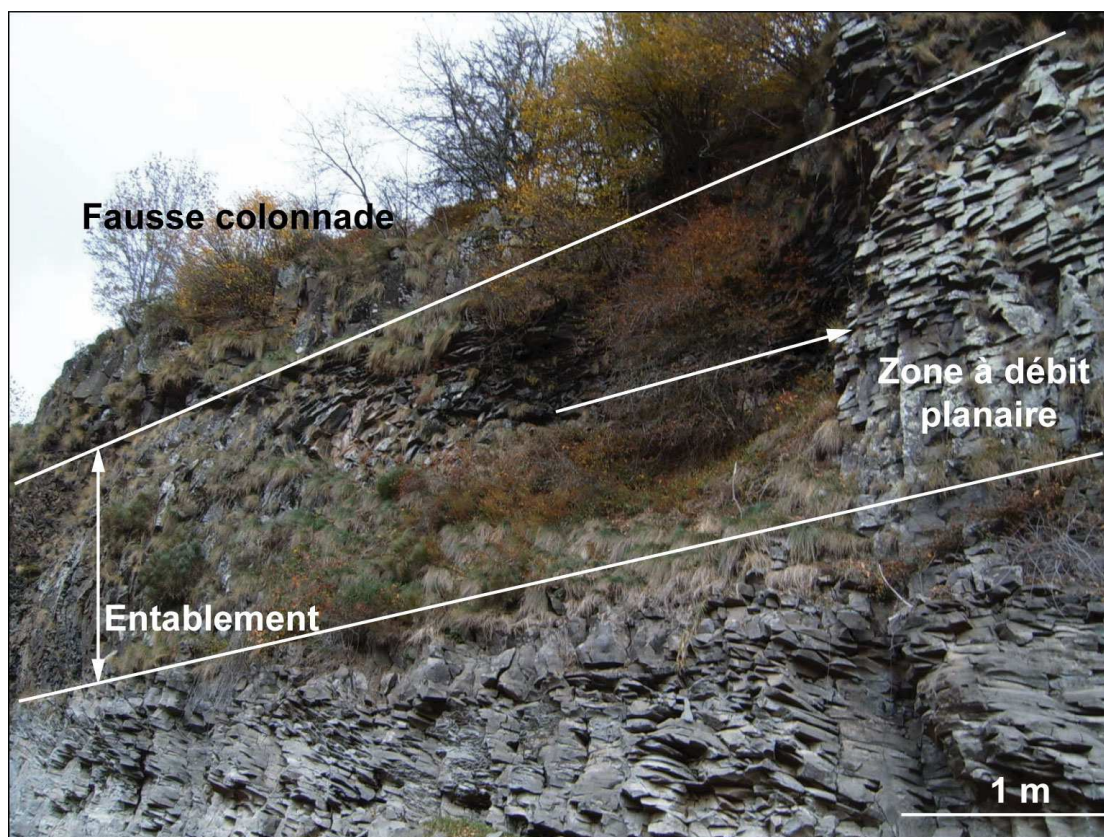


Figure 2-16: Passage latéral entre entablement et zone à débit planaire, la Palisse village





Figure 2-17: Affleurement le long de la Loire, où l'entablement se situe au-dessus de la zone à débit planaire avec à la base une colonnade peu développée, La Palisse village.

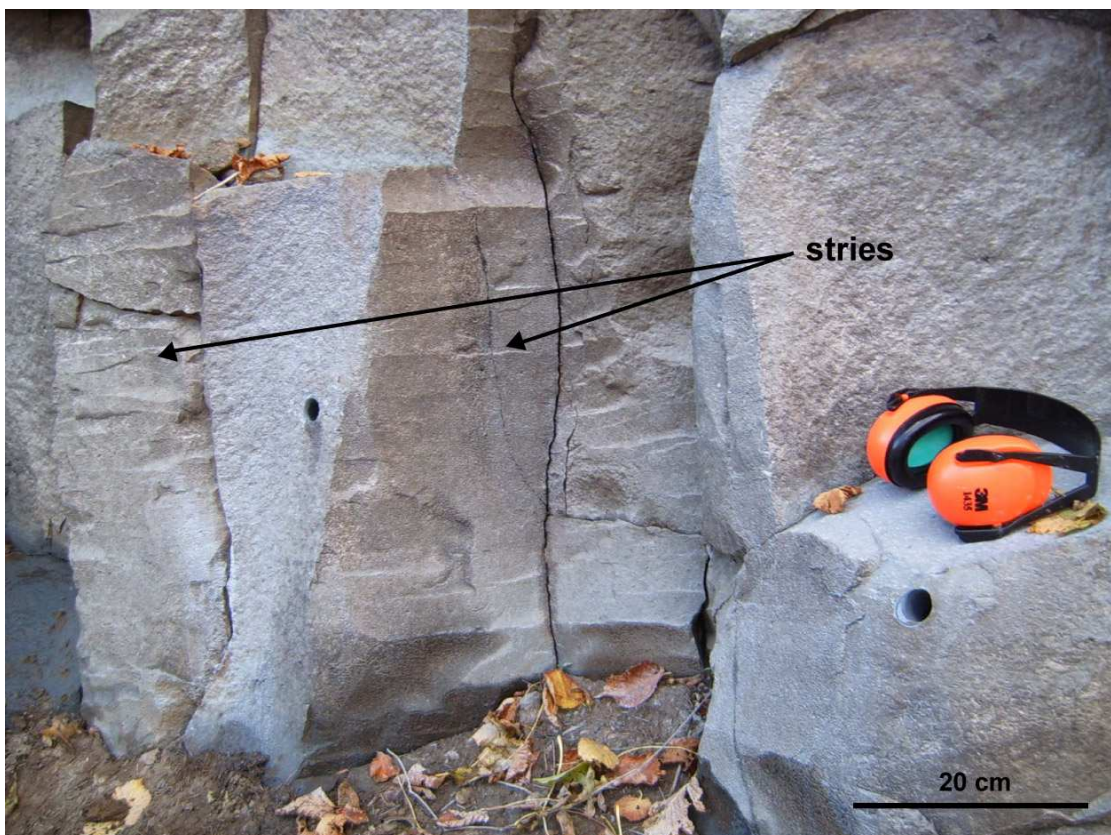


Figure 2-18: Observation de stries sur les faces des prismes qui constituent la colonnade sur le site de La Palisse village.





Figure 2-19: Prismes de diamètre de 20 cm inclinés vers la rivière du site de La Palisse village.

Pour conclure, les affleurements de la coulée de fond de vallée de La Palisse offrent une vue d'ensemble sur la structure d'une coulée de centre d'émission et de sens d'écoulement connus. Les trois niveaux de la coulée, colonnade, entablement et pseudo-colonnade, sont parfaitement visibles et accessibles pour l'échantillonnage. Des études à l'échelle de la coulée et à l'échelle du prisme peuvent ainsi être réalisées. En revanche la succession des trois niveaux dans la coulée n'est pas systématique, ce qui complique la comparaison entre les sites du barrage et du village. Ces différences de structuration pourraient être dues à la géométrie de la paléosurface sur laquelle la coulée de lave s'est mise en place. En effet, la topographie joue un rôle important sur la morphologie de surface et le refroidissement de la coulée dans des laves récentes (Soule et al. 2004), ce qui implique probablement une influence sur la structure interne de la coulée. Malheureusement, les conditions d'affleurement de la coulée de La Palisse ne permettent pas l'observation en continu du contact de la coulée avec son substratum et donc de vérifier l'influence de la géométrie de la paléosurface. Néanmoins, cette coulée reste très intéressante pour une étude structurale mais aussi géochimique du fait de la fraîcheur des échantillons.

### 3. Études de terrain sur la coulée de Saint-Arcons-d'Allier (Haute-Loire)

#### 3.1. Localisation de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier

La succession de coulées de Saint-Arcons-d'Allier est située vers l'extrémité nord-ouest du Devès, à moins d'un kilomètre au sud-est du village de Saint-Arcons-d'Allier le long de la D48



(coordonnées GPS 5, *Tableau 2- 1*) (*Figure 2-20*). Cette série est composée de quatre coulées superposées (Bout 1960; Cantagrel & Prévot 1971). La base de la coulée la plus ancienne est à quelques mètres au-dessus du niveau de l'Allier et la coulée la plus récente (située au niveau du site d'échantillonnage, *Figure 2-20*) domine la plus ancienne d'une centaine de mètres. Ces coulées sont datées à 2,8 Ma pour la plus ancienne (Cantagrel & Prévot 1971) et 0,6 Ma pour la plus récente. Les âges radiométriques (K-Ar) des quatre coulées obtenus par Fouris (1989) sont reportés dans le *Tableau 2- 2* :

Numéro de coulée	Âges K-Ar (Ma)
1	2,8 +/- 0,20
2	1,23 +/- 0,10
3	0,96 +/- 0,06
4	0,60 +/- 0,06

Tableau 2- 2 : Âges (K-Ar) des quatre coulées de la série de Saint-Arcons-d'Allier Fouris, 1989.

Les laves de Saint-Arcons-d'Allier sont des basaltes alcalins à olivine avec des compositions chimiques très similaires pour les quatre coulées successives (Cantagrel & Prévot 1971). Les coulées 3 et 4 (les plus récentes) possèdent une mésostase très fine et riche en verre. Dans les coulées 1 et 2, des xénocristaux de quartz entourés d'une auréole réactionnelle ainsi que quelques carbonates secondaires sont observés. Le site d'échantillonnage est atteint après le village de Saint-Arcons-d'Allier, en continuant sur la route D48 qui longe le cours de l'Allier en direction du sud-est. Il se situe au sein d'une carrière d'exploitation de basalte à ciel ouvert (*Figure 2-20*). La zone d'exploitation de la carrière nous apporte peu d'information sur la structure des coulées de lave, les contacts entre les différentes coulées étant difficiles à observer. Par contre, à même le sol, un grand nombre de section de prismes détachés de l'affleurement sont à disposition (*Figure 2-26*). Ces sections sont d'environ 20 cm de diamètre, ce qui permet de prélever plusieurs prismes. Les affleurements présentant la succession des différents niveaux de la coulée se trouvent un peu à l'écart de la zone exploitée.

### 3.1. Les affleurements au niveau de la carrière.

Les premiers affleurements sont visibles le long de la D48, où apparaît le contact entre la base d'une coulée et le substratum (*Figure 2-21*). Les prismes systématiquement perpendiculaires à la paléosurface suggèrent une forte influence de la géométrie de cette paléosurface sur la structure interne de la coulée. Une vue d'ensemble de cet affleurement permet de distinguer deux coulées superposées (*Figure 2-22*) comprenant chacune une succession colonnade - entablement. A cause du manque d'affleurement, nous n'avons pas pu observer le contact entre les deux coulées les plus récentes. Toujours à partir de la route, un affleurement de très bonne qualité permet de mettre en évidence le contact très net entre la colonnade et l'entablement (*Figure 2-23*). Malheureusement, sa difficulté d'accès rend peu pratique l'échantillonnage. Au niveau de la carrière, en retrait de la zone exploitée, se trouve un affleurement idéal pour l'étude des colonnades et de la transition colonnade-entablement de la coulée 1 (*Figure 2-24*). Les prismes y sont très longs (plus de 6 m), et larges de 20 cm. Le contact entre colonnade et entablement dans les quatre coulées est toujours très net.

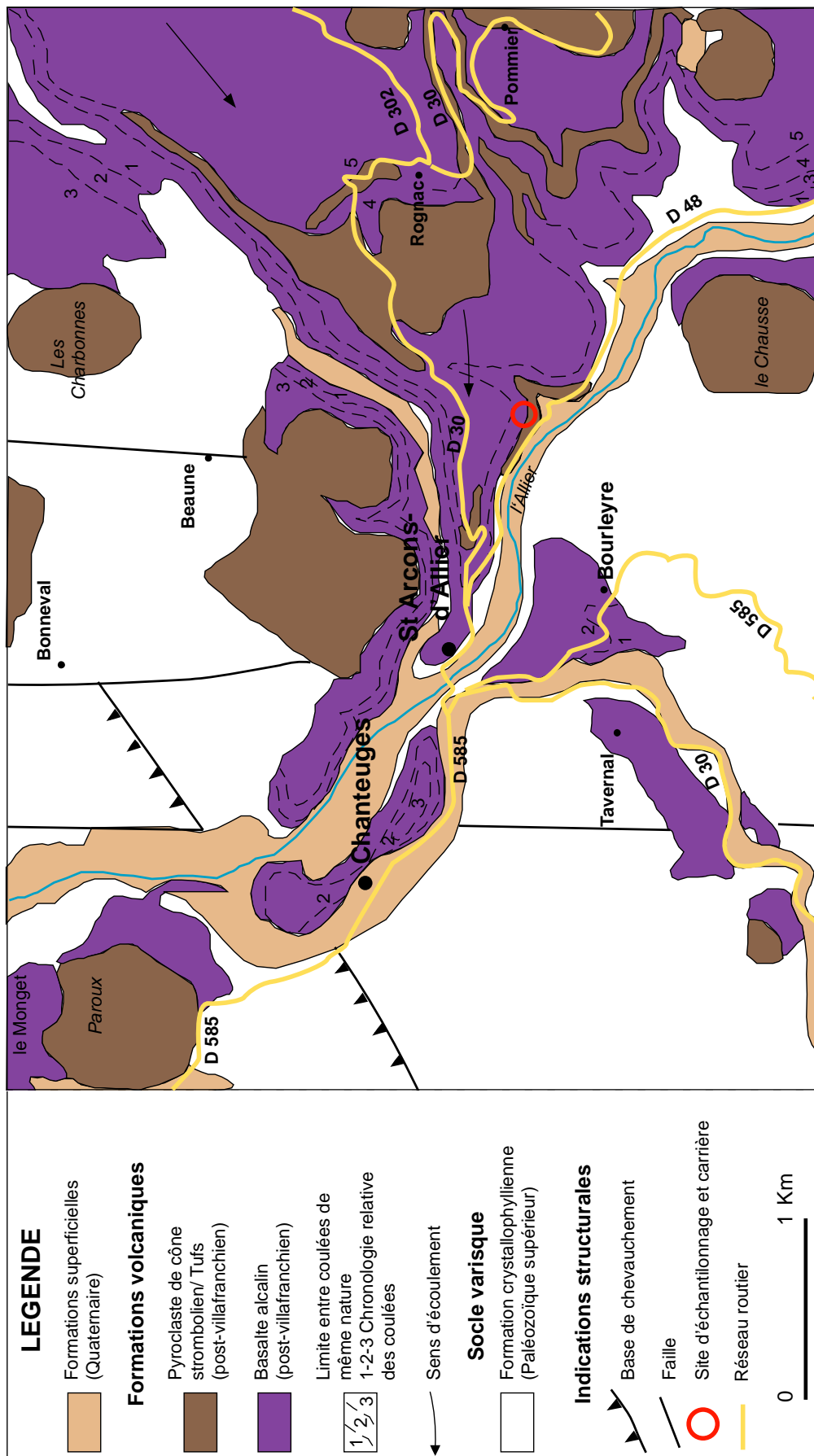


Figure 2-20: Carte géologique du secteur de Saint-Arcons-d'Allier (Marchand et al. 1989).

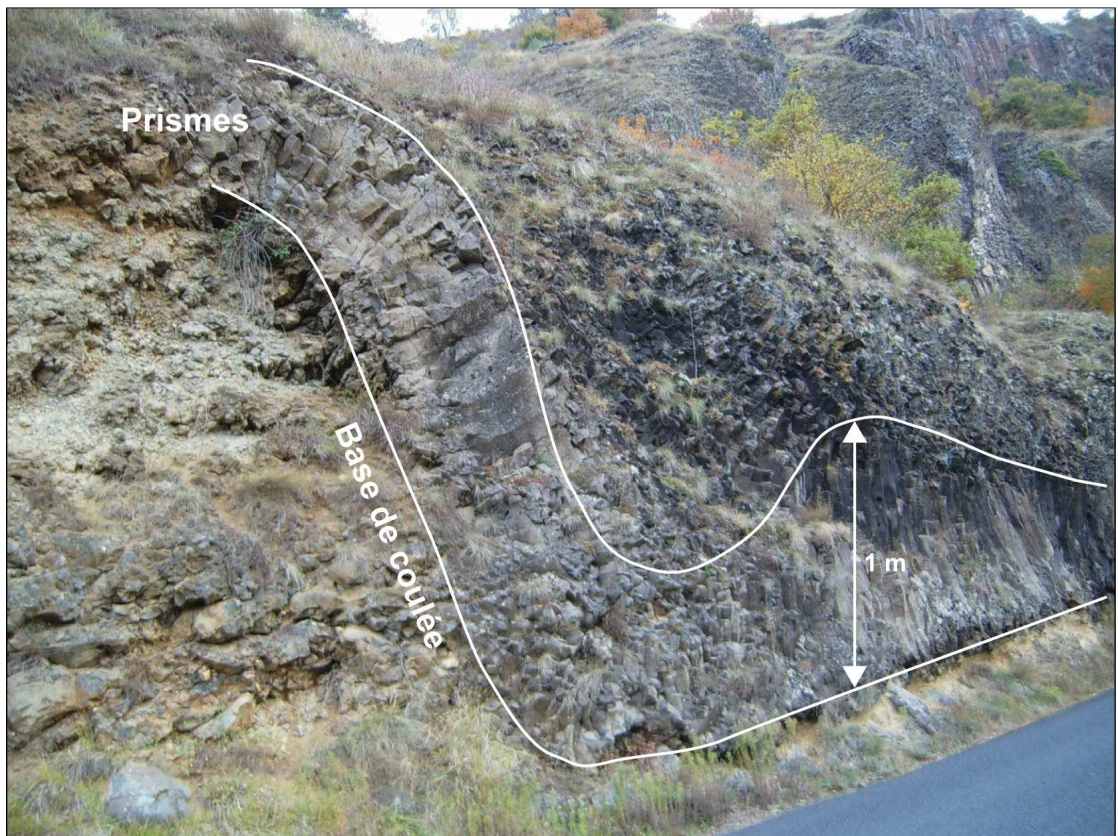


Figure 2-21: Base de la coulée 1 de Saint-Arcons-d'Allier, au bord de la route D48.

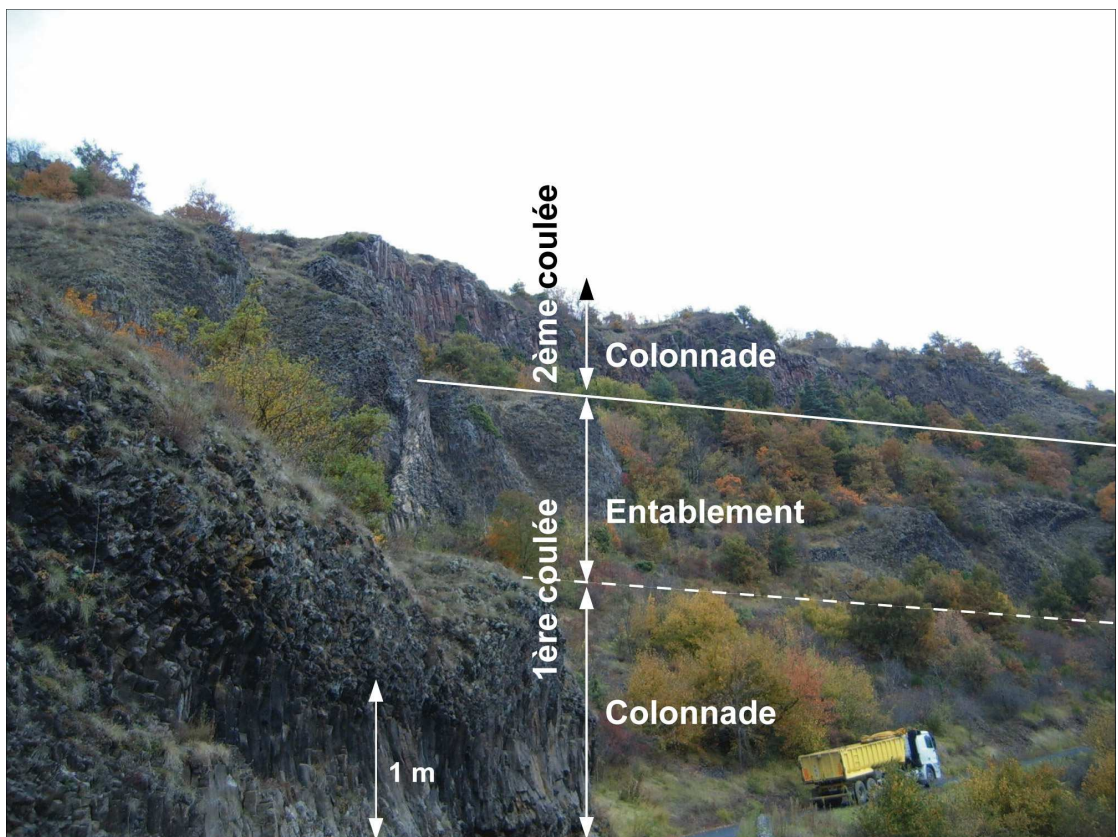


Figure 2-22: Contact entre les différentes coulées de Saint-Arcons-d'Allier.



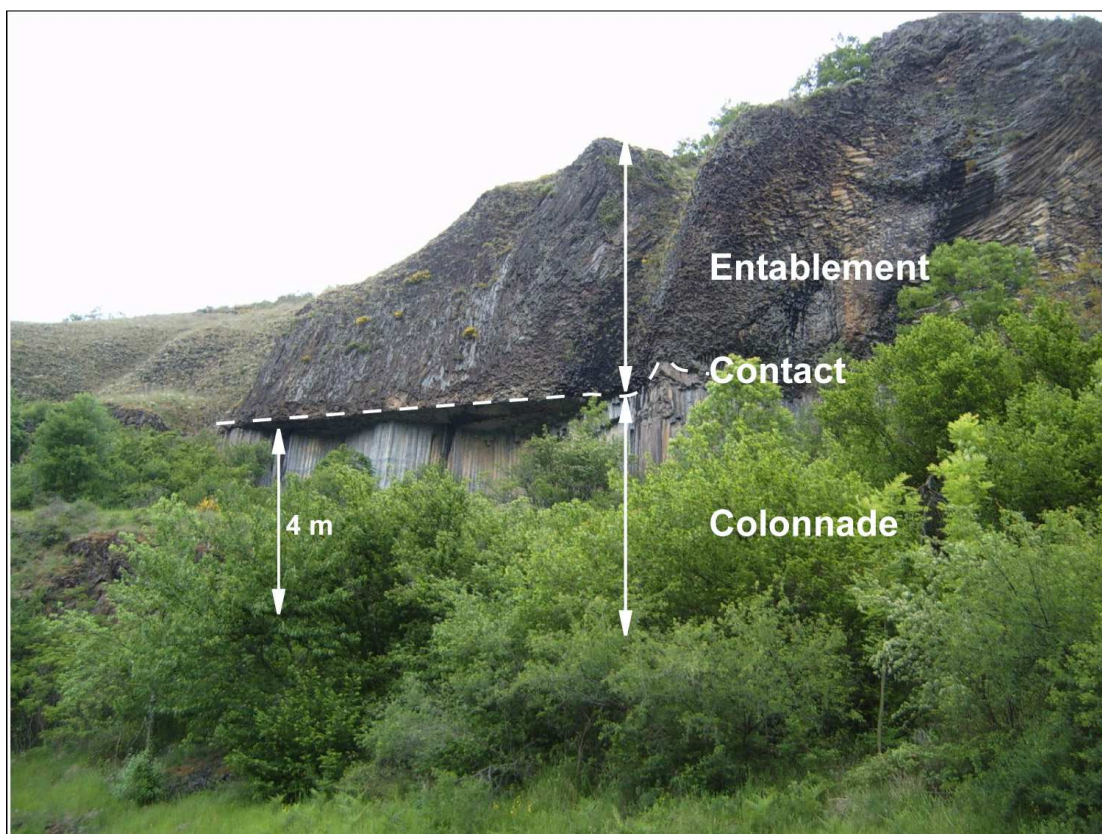


Figure 2-23: Affleurement de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier au bord de la route D48. Le contact entre la colonnade et l'entablement est net.

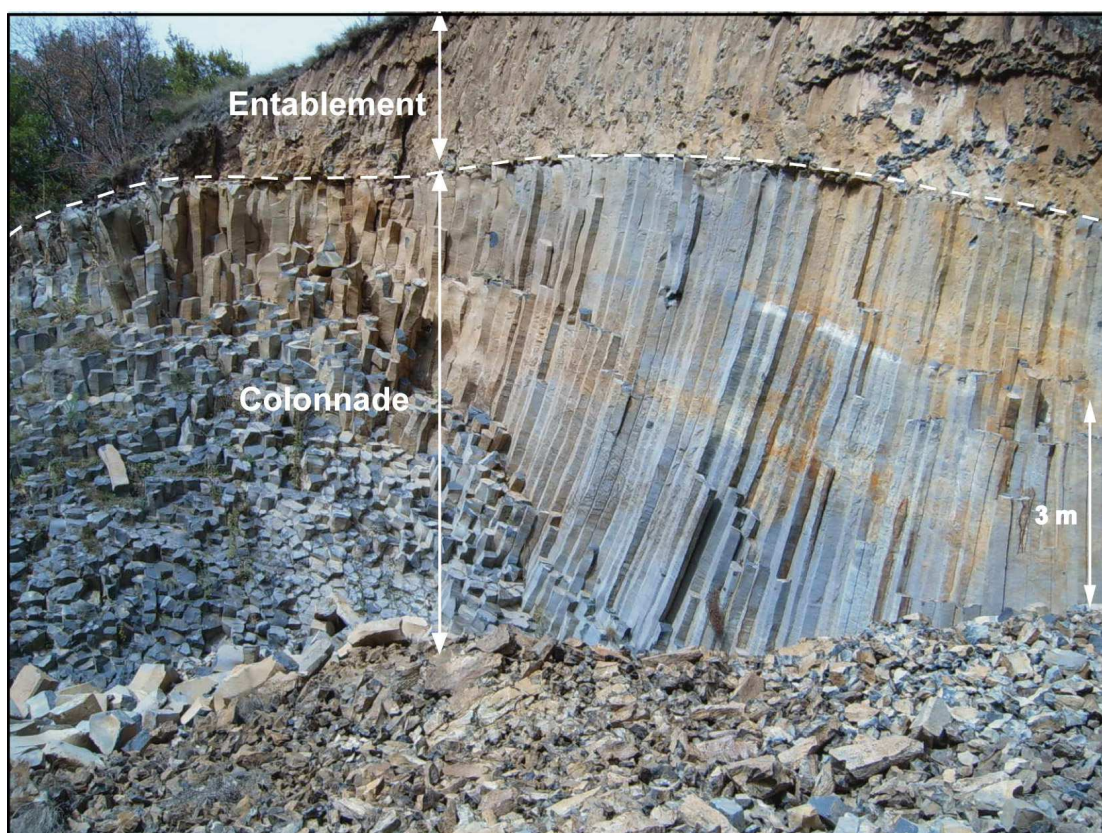


Figure 2-24: Site d'échantillonnage des colonnes issues de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier, à proximité de la carrière. Le contact net entre la colonnade et l'entablement se retrouve sur cet affleurement.



### 3.2. Les prismes dans la carrière.

A côté de l’affleurement situé près de la zone exploitée de la carrière (*Figure 2-24*) sont également disposés au sol des prismes isolés de diamètre plus important (40 cm) que ceux de la colonnade. Leur section fait apparaître en relief des cercles inscrits dans les prismes (*Figure 2-25*) comme observé à la Chaussée des Géants en Irlande (*cf. chapitre 1*). Dans la zone d’exploitation de la carrière, de nombreuses sections de prismes présentent également des rubans noirs qui suivent les bords des prismes et d’autres internes avec une géométrie différentes de celles du prisme (*Figure 2-26*). Ces différents rubans feront l’objet d’études pétrographiques et géochimiques afin de déterminer leur nature.

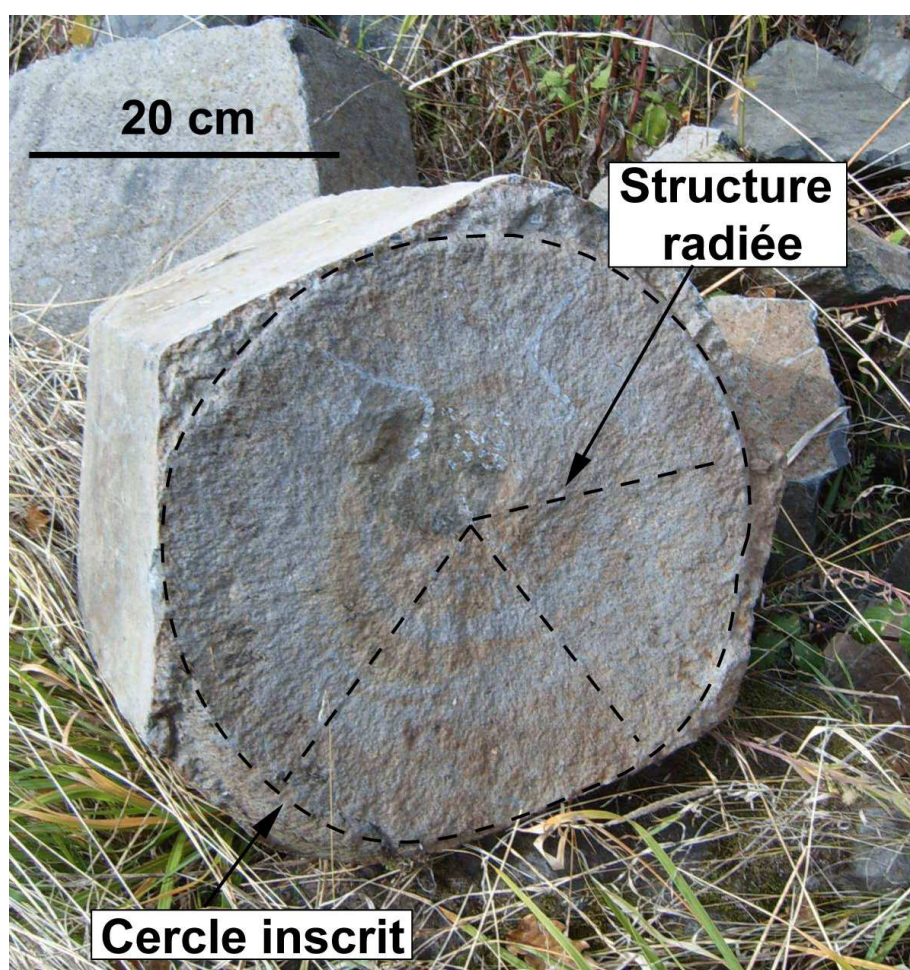


Figure 2-25: Section de prisme isolé avec cercle inscrit

La coulée de Saint-Arcons-d’Allier, contrairement à celle de La Palisse, ne présente pas les trois niveaux d’une coulée prismée (absence de pseudo-colonnade). Cependant, elle offre une colonnade bien développée et dont les prismes ont un diamètre de plus petite taille (environ 20cm contre 40cm pour La Palisse). Ces caractéristiques permettent de réaliser des études à l’échelle de la colonne afin de caractériser d’éventuelles variations structurales ou géochimiques entre la base de la colonne et le sommet situé près de l’entablement. Cette coulée est également propice à des études à l’échelle d’une section de prisme, dans le but d’apporter des informations supplémentaires sur les mécanismes de formation des prismes. Par ailleurs, des études géochimiques ont été menées afin de

déterminer l'origine des rubans noirs et préciser s'ils résultent d'une simple altération actuelle ou s'ils sont des témoins de processus post-magmatiques lors de la formation des prismes.

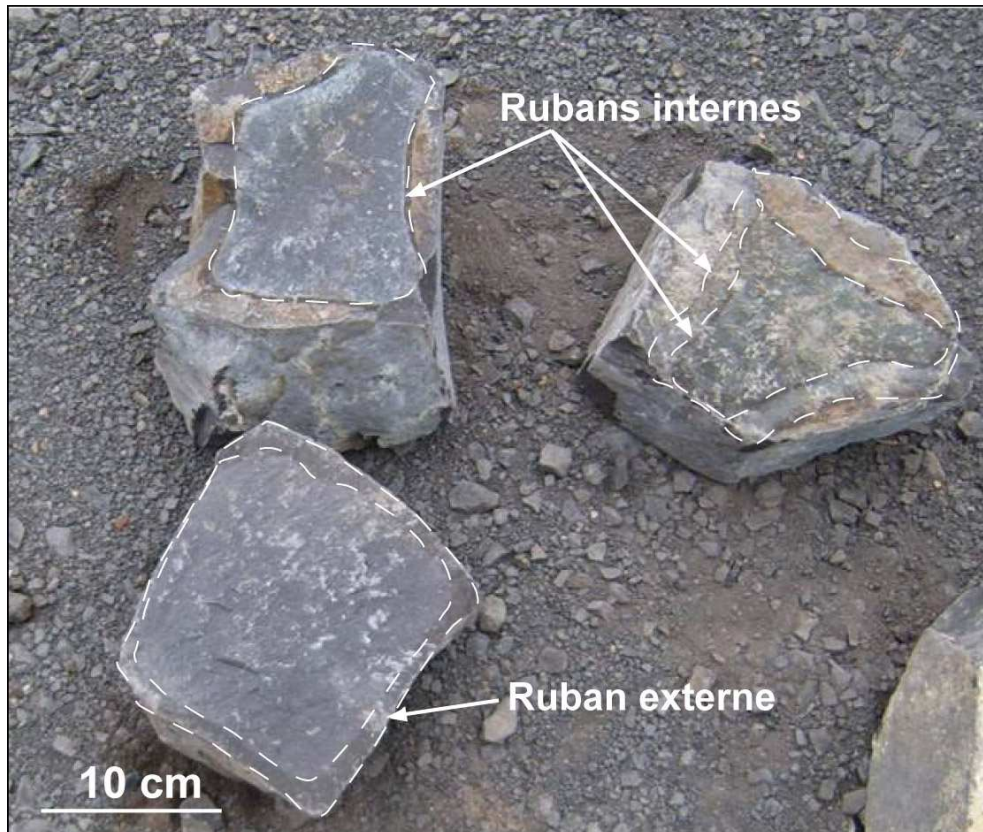


Figure 2-26: Prismes isolées issus de la carrière de Saint-Arcons-d'Allier

## Conclusion :

Le choix des deux coulées décrites dans ce chapitre correspond aux critères définis pour notre étude: la coulée de la Palisse offre des affleurements où les trois niveaux (colonnade, entablement et pseudo-colonnade) apparaissent clairement. Cette coulée est également bien contrainte du fait de la connaissance de son centre d'émission et du sens d'écoulement. Enfin, elle est très récente (environ 78 800 ans). Malgré son âge plus important, la coulée de Saint-Arcons-d'Allier présente des affleurements de très bonne qualité. Ils s'avèrent idéaux pour l'étude de la colonnade et de la transition colonnade-entablement, ainsi que pour l'étude des prismes eux-mêmes, permettant ainsi une étude multi-échelle des structures.

Dans ces coulées différentes approches sont menées. Des échantillonnages par carottage effectués dans les différents niveaux de la coulée de la Palisse permettent d'avoir accès à la structure interne via des techniques comme l'Anisotropie de Susceptibilité Magnétique (ASM), couplée à des analyses de l'orientation préférentielle de réseau et de forme. Des analyses chimiques sur roche totale des éléments majeurs, traces et terres rares donnent des informations sur d'éventuelles différences de mise en place entre les trois niveaux de la coulée. La coulée de Saint-Arcons-d'Allier permet d'aborder l'échelle de la colonne et du prisme, avec des mesures pétrophysiques détaillées permettant des cartographies minéralogiques et l'étude des variations des paramètres magnétiques

(ASM, hystérésis), ainsi que des études géochimiques (éléments majeurs, traces, terres rares et isotopes H et O) à l'échelle du prisme.

### Chapitre 3. Caractérisation pétrographique, texturale et géochimique des laves de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier.



## Introduction :

Après avoir replacé dans leur contexte volcanique les coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier, ce chapitre est consacré à l'étude pétrographique, texturale et géochimique des échantillons prélevés sur ces coulées. Nous travaillons ici à l'échelle de la coulée dans le but de mettre en évidence d'une part, d'éventuelles différences entre la colonnade, l'entablement, la zone à débit planaire et la pseudo-colonnade pour la coulée de La Palisse, et d'autre part d'éventuelles variations de la base au sommet de la colonnade dans la coulée de Saint-Arcons-d'Allier. Nous commençons par décrire la pétrographie et la texture des différents échantillons en nous basant sur l'étude au microscope optique de lames minces, l'analyse d'image et l'orientation préférentielle de réseau (OPR). Nous discutons ensuite de la géochimie des éléments majeurs, traces et terres rares ainsi que des isotopes stables, en comparant dans un premier temps nos résultats avec les données de la littérature traitant des coulées de composition chimique semblable dans le Massif Central et dans un second temps en comparant entre elles les différentes parties des coulées. Nous présentons également les résultats d'analyses des teneurs en éléments majeurs des différents minéraux qui composent les échantillons, obtenus grâce à la microsonde électronique. Enfin, nous discutons des données isotopiques de l'hydrogène et de l'oxygène des différents niveaux dans les coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier.

## 1. Étude pétrographique et minéralogique

### 1.1. Analyse pétrographique et composition modale par analyse d'image

L'étude pétrographique est réalisée à partir de 50 lames minces pour la coulée de La Palisse et de 27 lames minces pour la coulée de Saint-Arcons-d'Allier, au microscope optique en lumière polarisée non analysée (LPNA), en lumière polarisée analysée (LPA) et en lumière réfléchie (LR). Les photos à partir desquelles l'analyse d'image a été réalisée ont été prises à partir d'un dispositif Leica DFC420C monté sur le microscope.

L'analyse d'image se base sur l'analyse de la forme des grains les plus gros qui composent la roche, correspondant aux phénocristaux dans le cas des roches volcaniques telles que les basaltes. Elle peut se faire sur une image en deux dimensions, donc à partir d'une seule lame mince, ou en trois dimensions à partir de 3 lames minces coupées perpendiculairement les unes par rapport aux autres. Les lames minces sont digitalisées, les images obtenues pouvant subir des traitements différents selon les minéraux que l'on souhaite analyser.

Les phases minérales principalement étudiées dans notre cas par analyse d'image sont les olivines, les pyroxènes, les plagioclases et les oxydes. Selon la phase à analyser, l'image et la méthode employées seront différentes. Pour les oxydes, les images sont acquises en lumière réfléchies (*Figure 3- 1a*). Elles permettent de mettre en évidence les grains d'oxydes qui facilitent le seuillage réalisé avec le logiciel de traitement d'image *Image J* (*Figure 3- 1b*). Ce logiciel permet également de faire de l'analyse de particules, qui peut donner des informations sur la taille des grains (axes longs et courts des particules), la sphéricité des grains (paramètres de circularité =  $4\pi \times (\text{Aire}/\text{périmètre}^2)$ ) et la proportion des grains sur l'image.

Cette même image réfléchie permet de mettre en évidence les phénocristaux d'olivine et de clinopyroxène (en gris clair) et la mésostase (gris foncé) dont font partie les grains d'oxydes. Nous pouvons ainsi estimer les proportions entre les phénocristaux d'olivine et de clinopyroxène, et la mésostase. Les microphénocristaux de plagioclase, non visibles en LR, sont observés en LPA. Comme les plagioclases contenus dans la lame mince ont une position d'extinction variable, il est nécessaire d'utiliser un montage spécifique sur une binoculaire (Fueten 1997). Celui-ci permet de prendre des photos d'une même lame mince en LPA en tournant les polariseurs afin d'obtenir le maximum de minéraux éclairés. Nous avons tourné les polariseurs tous les 30° de 0° jusqu'à 150°. Les 6 photos ainsi obtenues sont combinées pour ne former qu'une seule image contenant le maximum de minéraux allumés (*Figure 3- 2a*) en utilisant le logiciel *Image2003* de Patrick Launeau (Université de Nantes). Après un traitement d'image faisant ressortir le plus possible les plagioclases (*Figure 3- 2b*), nous pouvons retirer une information sur la fabrique de forme, soit en deux dimensions (une seule image) soit en trois dimensions lorsque l'image est combinée avec deux autres images perpendiculaires. Cette fabrique de forme est obtenue par la méthode des interceptes avec le logiciel *Intercepts* de Patrick Launeau (Launeau & Robin 1996). En deux dimensions, ce logiciel permet d'obtenir une rose des directions de l'orientation préférentielle de forme (*Figure 3- 2c*).

Cependant, selon la section de la lame mince, la texture fluidale n'est pas toujours visible. Seule l'analyse d'image à partir de 3 lames minces coupées perpendiculairement entre elles permettrait une vision en 3 dimensions. Cette méthode est fastidieuse et pas toujours facile à mettre en place, surtout quand les grains sont de petite taille et que les contrastes de couleur entre les différentes phases sont peu marqués.

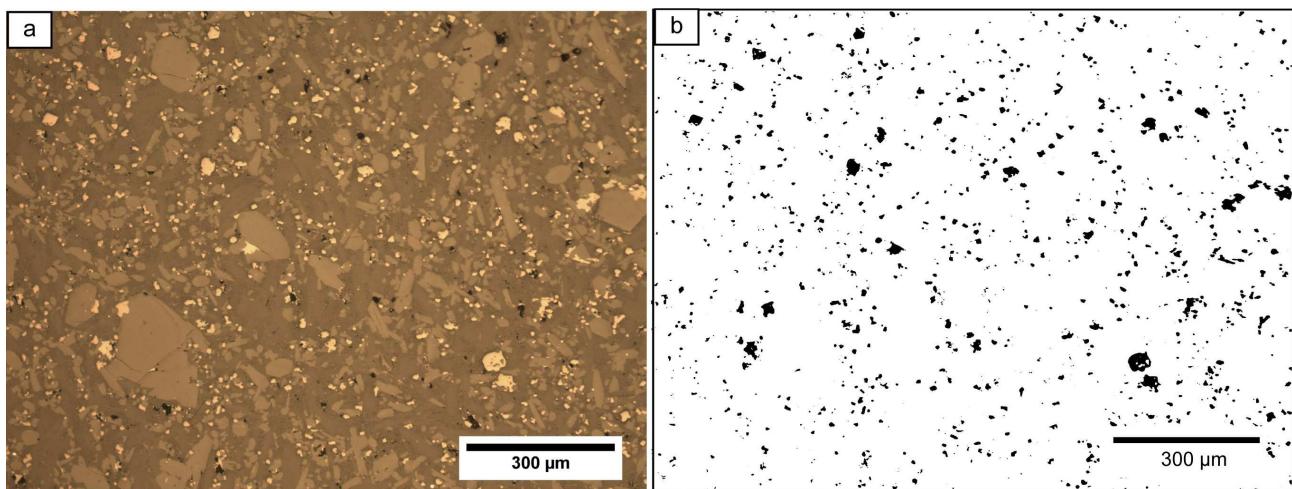


Figure 3- 1 : (a) Photo au microscope optique en lumière réfléchie. Les grains blancs sont les oxydes. (b) Seuillage effectué avec le logiciel Image J permettant de ne faire ressortir que les grains d'oxydes.

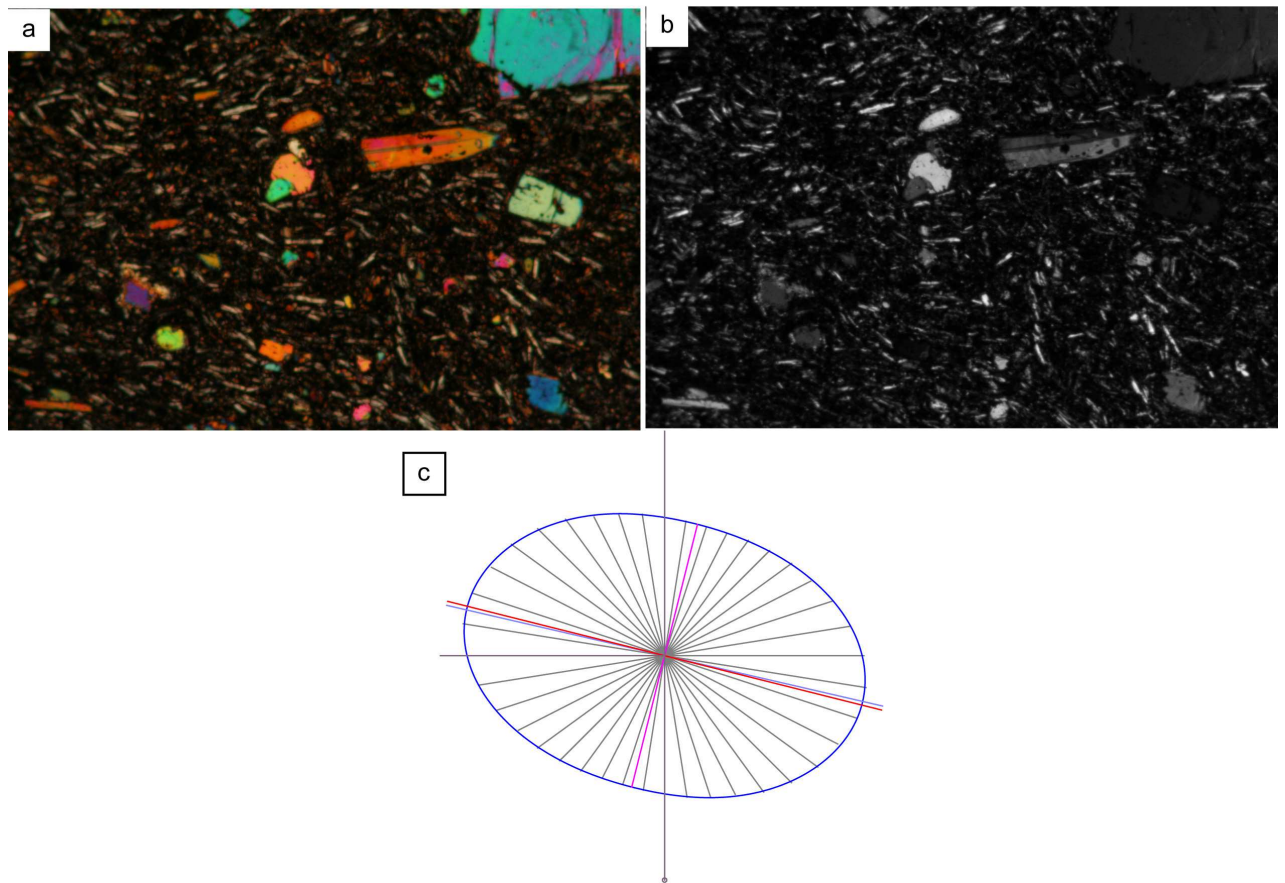


Figure 3- 2 : Images traitées avec le logiciel *Image2003*. (a) Image contenant le maximum de minéraux allumés, obtenue par la combinaison de 6 photos à différents angles de rotation des polariseurs. (b) Traitement de l'image (a) où les plagioclases sont mis en avant correspondant aux grains les plus blancs et de petite taille. (c) Rose de direction de l'orientation préférentielle de forme issue du logiciel *Intercepts* de Patrick Launeau (Launeau & Robin 1996). Les axes de couleur rose correspondent aux axes long et court de la fabrique de forme, l'axe vertical correspond à l'orientation de la lame mince avec X positionné en bas de l'image.

## 1.2. Mesure des orientations préférentielles de réseau (OPR)

La mesure de l'orientation préférentielle de réseau des minéraux permet, comme l'analyse d'image de mettre en évidence les textures fluidales. Pour la caractérisation des OPR, l'utilisation la technique EBSD (Electron Back Scattering Diffraction) à l'avantage d'apporter une vision en 3 dimensions de l'orientation des minéraux quelque soit leur symétrie, à partir de mesures sur lame mince.

La technique EBSD repose sur l'exploitation des figures de diffraction des électrons rétrodiffusés obtenues dans un microscope électronique à balayage (MEB). La mise en œuvre de l'analyse EBSD dans un MEB se fait à partir d'un faisceau focalisé d'électrons d'énergie suffisante (15 à 30 keV). L'échantillon analysé est monté sur lame mince dont la surface plane est obtenue par un poli d'excellente qualité afin de minimiser au maximum les reliefs. Les électrons rétrodiffusés forment des figures de diffraction sur un écran fluorescent et une caméra à bas niveau de lumière qui prend en temps réel l'image de ces figures permet de les numériser (*Figure 3- 3*). L'échantillon est fortement incliné par rapport au faisceau d'électrons, avec une inclinaison optimale à  $70^\circ$  qui permet

un bon compromis entre l'obtention d'une émission maximale d'électrons rétrodiffusés et la nécessité de limiter les effets de la rugosité résiduelle de l'échantillon (Pouchou 2004).

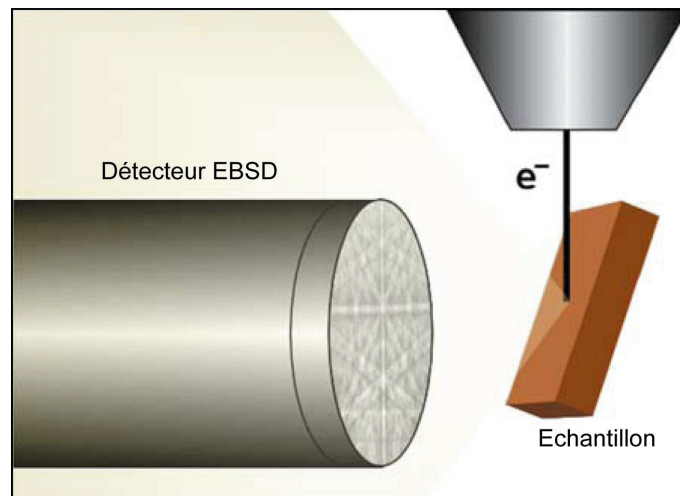


Figure 3- 3 : Disposition dans le MEB des éléments principaux d'un système EBSD avec un faisceau électronique focalisé, un échantillon incliné à 70°, un détecteur latéral (Schwartz & Kumar 2009).

L'analyse EBSD permet de déterminer l'orientation cristallographique du point d'analyse par comparaison des figures de diffraction mesurées avec les sphères de diffraction modèles d'un jeu de structures cristallographiques (les différentes phases à mesurer sur la lame mince). L'orientation du cristal par rapport à un repère fixe lié à l'échantillon est exprimée par les angles d'Euler ( $\varphi_1$ ,  $\Phi$ ,  $\varphi_2$ ). La définition des angles d'Euler la plus usuelle est celles de Bunge (Bunge 1982), dans laquelle ( $\varphi_1$ ,  $\Phi$ ,  $\varphi_2$ ) sont les rotations successives qui font passer du repère échantillons  $R_s$  ( $X_s$ ,  $Y_s$ ,  $Z_s$ ) au repère cristallin  $R_c$  ( $X_c$ ,  $Y_c$ ,  $Z_c$ ).

L'orientation préférentielle de réseau a été mesurée sur les phases principales composant nos échantillons telles que les clinopyroxènes, les plagioclases et les titanomagnétites sur le MEB Zeiss Supra 55 VP de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne, utilisant le système HKL Channels 5 et le logiciel Flamenco pour l'indexation des figures de diffraction. La qualité des figures de diffraction des phases analysées n'étant pas suffisante pour permettre des indexations en mode automatique, nous avons procédé à des mesures manuelles, grain par grain, avec 250 grains de plagioclases et de clinopyroxènes analysés pour chaque échantillon et 90 grains pour les titanomagnétites. Les orientations de chaque phase sont représentées sous la forme de figures de pôle correspondant à des projections en hémisphère inférieure et aire égale pour 3 plans : les plans (100), (010) et (001) pour les plagioclases et les clinopyroxènes qui sont les plans des faces les plus impliquées dans l'écoulement (voir illustration des monocristaux des différentes phases chapitre 4). La titanomagnétite étant de symétrie cubique, les 3 axes sont projetés : [100], [111] et [110]. Les figures de pôle ont pour référence les repères x (azimut des carottes) et z (inclinaison des carottes) des échantillons. Les orientations cristallographiques (axes ou pôle des plans) de toutes les phases d'un même échantillon sont alors comparables entre elles. Les figures de pôle ont été obtenues en utilisant les logiciels de David Mainprice de l'université de Montpellier II ([ftp://www.gm.univmontp2.fr/mainprice//CareWare\\_Unicef\\_Programs/](ftp://www.gm.univmontp2.fr/mainprice//CareWare_Unicef_Programs/)). L'index de fabrique J,

qui indique l'intensité de la fabrique cristallographique de l'échantillon, possède une valeur de 1 quand la distribution est aléatoire et tend vers l'infini pour un monocristal (Bunge, 1982).

Nous avons analysé l'OPR des plagioclases, clinopyroxènes et titanomagnétites de 12 lames minces issues des différents niveaux de la coulée de La Palisse. Nous avons constaté que pour tous les échantillons, les plagioclases présentaient les maxima de densité les plus importants reflétant une texture fluidale marquée dans tous les niveaux de la coulée. La **Figure 3- 4** présente l'OPR de l'échantillon 08tb22b issu de la colonnade et représentatif de ce que l'on observe dans tous les niveaux de la coulée de La Palisse. Nous pouvons constater que les maxima de densités sont assez importants surtout pour le plan (010) (MD = 5,92), qui correspond au plan le plus large et parallèle à l'écoulement.

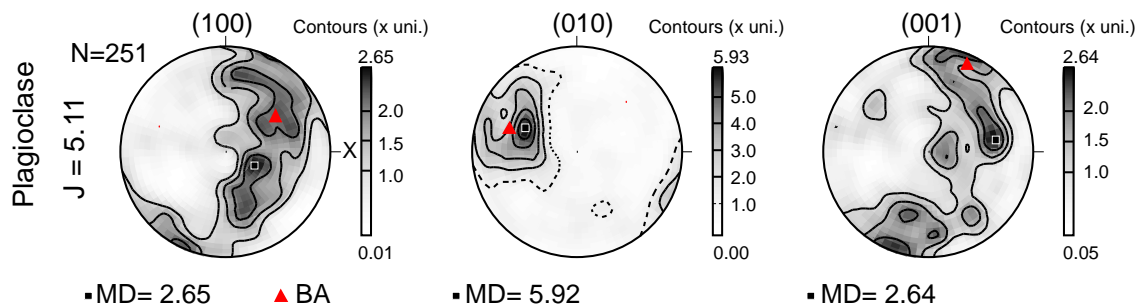


Figure 3- 4 : Orientation préférentielle de réseau des plagioclases de l'échantillon 08tb22b obtenue par EBSD, projetée dans un stéréogramme en hémisphère inférieur et aire égale. N est le nombre de grains analysés, MD correspond au maximum de densité et BA le « Best Axis » (eigenvector), J est la force de fabrique calculé pour le plagioclase.

L'une des applications de l'orientation préférentielle de réseau par EBSD est donc de mettre en évidence des fabriques cristallographiques portées par les plagioclases à tous les niveaux de la coulée de La Palisse et qui sont reliées à l'écoulement de la lave.

**En conclusion**, l'analyse d'image, qui informe sur l'orientation préférentielle de forme, et la technique de la diffraction des électrons rétrodiffusés, qui indique l'orientation préférentielle de réseau, sont des outils complémentaires permettant de mieux caractériser la texture des échantillons. De plus, comme ces orientations sont représentées dans le repère échantillon, elles peuvent être comparées entre elles et nous permettre d'identifier les relations entre orientation préférentielle de forme (OPF) et orientation préférentielle de réseau (OPR). Nous verrons dans le chapitre 4 que les relations entre ces différentes orientations préférentielles peuvent également être comparées avec les orientations des axes de susceptibilité magnétique et ainsi aider à l'interprétation des mesures d'Anisotropie de Susceptibilité Magnétique.

### 1.3. La coulée de La Palisse

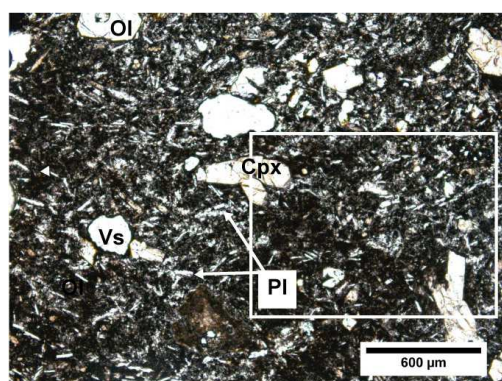
Nous avons réalisé un échantillonnage systématique par carottage sur la coulée de lave de La Palisse afin d'obtenir un nombre suffisant d'échantillons représentatifs dans tous les niveaux de la coulée et sur les deux sites (barrage et village, cf chapitre 2). Sur les carottes d'une dizaine de cm de long, ont été prélevés des spécimens de 2,5 cm de diamètre x 2,3 cm de long pour la mesure de l'Anisotropie de Susceptibilité Magnétique (ASM). Certains spécimens ont été sélectionnés pour la

confection de lames minces, le reste de l'échantillon étant broyé finement pour l'analyse chimique sur roche totale.

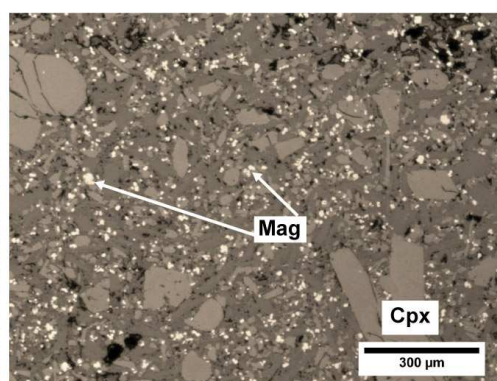
L'étude pétrographique se base donc sur les lames minces représentatives des différents niveaux de la coulée de La Palisse : la colonnade et l'entablement du site de La Palisse-barrage (site 1), la colonnade, la zone à débit planaire et la pseudo-colonnade du site de La Palisse-village (site 2). Les observations au microscope optique sont présentées pour chaque niveau de la coulée sur deux photos : l'une en LPNA et l'autre en LR (*Figure 3- 5*). La première photo permet de décrire les phénocristaux ( $> 500 \mu\text{m}$ ) d'olivine et de clinopyroxène ainsi que la texture de la roche et la seconde permet de mettre en évidence les minéraux opaques et la texture de la mésostase.

Les échantillons observés montrent une homogénéité de composition minéralogique à tous les niveaux de la coulée : phénocristaux d'olivine, phénocristaux de clinopyroxène, quelques microphénocristaux de plagioclase (dont la taille est comprise entre  $50$  et  $500 \mu\text{m}$ ) et une mésostase composée de microlites de plagioclase ( $<10 \mu\text{m}$ ), de clinopyroxènes et de minéraux opaques ainsi que de verre. Des xénocristaux d'olivine avec des couronnes réactionnelles ainsi que des xénocristaux du substratum (quartz) sont régulièrement observés dans les échantillons. Dans certaines lames minces, une texture fluidale peut apparaître. Comme indiqué dans la partie précédente, cette texture n'apparaît pas dans toutes les lames minces mais l'analyse d'image et l'OPR démontre que cette texture se retrouve dans tous les niveaux de la coulée. Les proportions des minéraux sont estimées par analyse d'image en utilisant le logiciel *Image J* et *Intercepts* pour le comptage de pixels. Les proportions de phénocristaux d'olivine et de clinopyroxène sont comparables entre les différents niveaux, en moyenne de 22%, avec une proportion plus élevée dans la colonnade (25%) et une proportion moindre pour l'entablement (19%). Les proportions de microlites de magnétite sont également similaires autour de 3%. La taille de ces microlites est légèrement différente selon le niveau : l'axe le plus grand de chaque grain de magnétite est de  $8 \mu\text{m}$  en moyenne pour les échantillons de l'entablement, de  $10 \mu\text{m}$  pour les échantillons de la colonnade et de la pseudo-colonnade et de  $7 \mu\text{m}$  pour la zone à débit planaire. Tous les grains de magnétite présentent une sphéricité proche de 0,8, ce qui signifie que leur forme est proche de celle d'un cercle. Le fait que les magnétites cristallisent dans le système cubique et que les grains aient une forme quasi circulaire nous indique que les grains de magnétites sont subautomorphes. Par ailleurs, la pseudo-colonnade présente une texture vésiculée qui ne se retrouve pas dans les autres niveaux de la coulée de La Palisse.



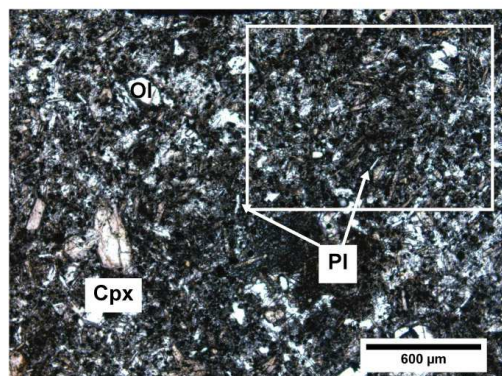


Pseudo-colonnade

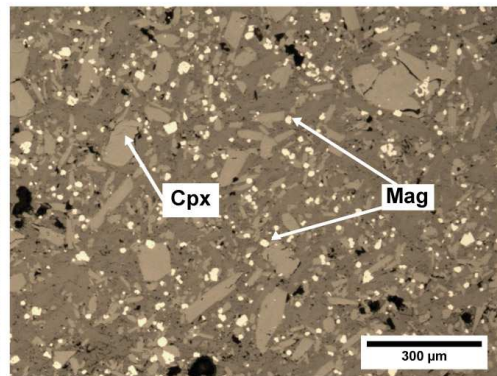


#### Compositon modale:

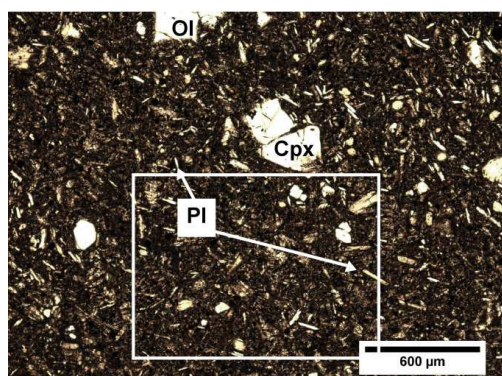
- Phénocristaux d'olivine et clinopyroxène: 23%
- Microphénocristaux de plagioclase: 2%
- Mésostase: 77% dont 3% de magnétite.



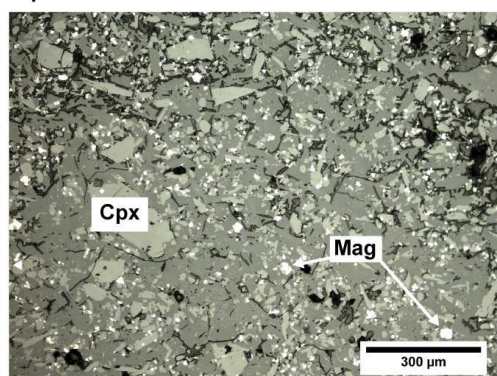
Zone à débit planaire



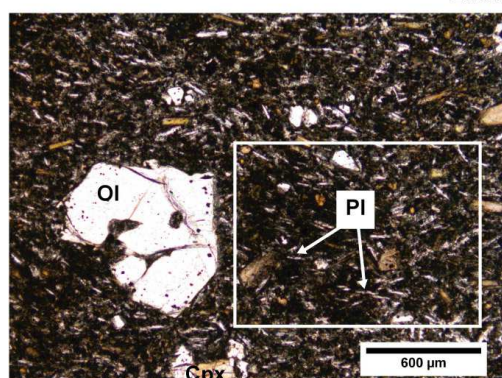
- Phénocristaux d'olivine et clinopyroxène: 19%
- Microphénocristaux de plagioclase: 3%
- Mésostase: 79 % dont 4% de magnétite.



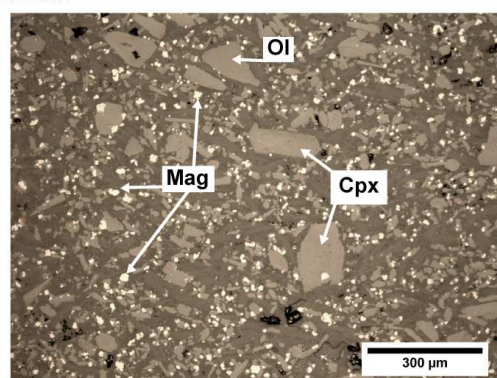
Entablement



- Phénocristaux d'olivine et clinopyroxène: 22%
- Microphénocristaux de plagioclase: 1%
- Mésostase: 77 % dont 3% de magnétite.



Colonnade



- Phénocristaux d'olivine et clinopyroxène: 25%
- Microphénocristaux de plagioclase: 2%
- Mésostase: 73% dont 3% de magnétite.

Figure 3- 5 : Observation au microscope optique de lames minces des différents niveaux de la coulée de La Palisse. Les photos de la colonne de gauche sont prises en LPNA, les photos de la colonne de droite (cadre blanc sur les photos de gauche) sont prises en LR. Ol : olivine, Cpx : clinopyroxène, Pl : plagioclase, Mag : magnétite et Vs : vésicule. La composition modale est estimée à partir de l'analyse d'image obtenue grâce au logiciel *Image J*.

## 1.4. La coulée de Saint-Arcons-d'Allier

Des lames minces ont été confectionnées à partir des carottages effectués dans un fragment de prisme de 3 m de long issu de la colonnade dont la base et le sommet sont repérés. Des carottages ont également été effectués dans la colonnade au contact de l'entablement, situé au-dessus du fragment de prisme (*Figure 3- 6*).

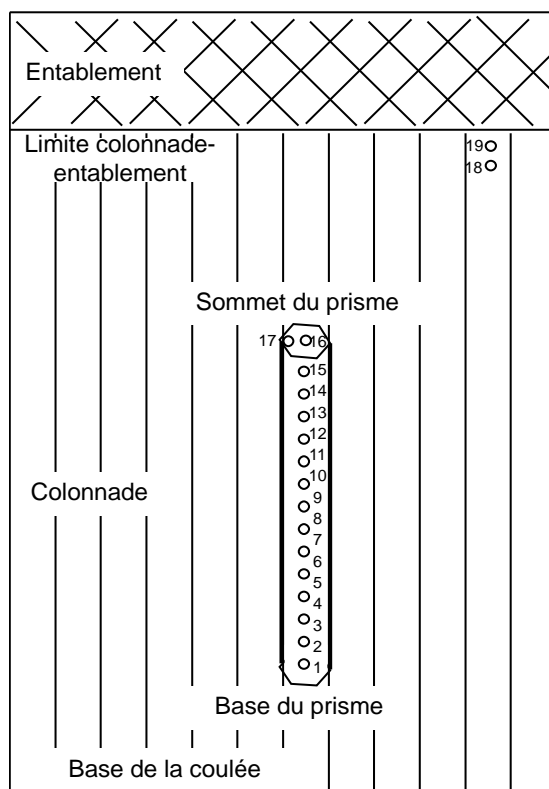
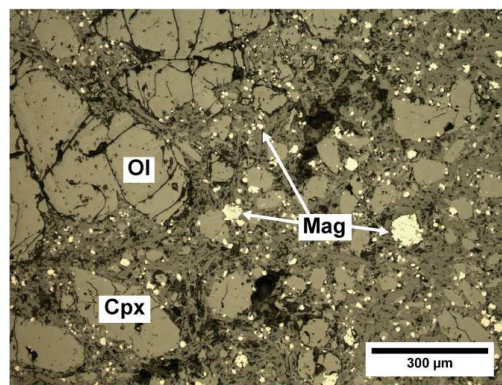
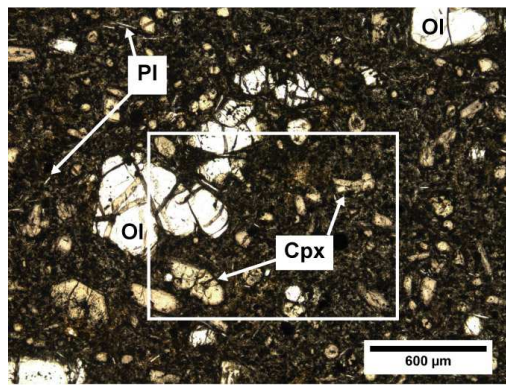


Figure 3- 6 : Schéma de la colonnade et de l'entablement de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier avec la disposition du prisme dans la colonnade et la position des échantillons issus de la colonnade au contact de l'entablement. Les cercles correspondent aux carottages effectués le long du prisme et dans la colonnade au contact de l'entablement.

Les photos de ces lames sont présentées de la même façon que pour celle de la coulée de La Palisse (*Figure 3- 7*). Nous avons comparé les échantillons issus de la base, du milieu et du sommet du prisme et ceux situés au contact entre la colonnade et l'entablement. Ces échantillons ont une composition minéralogique sensiblement similaire à celle de La Palisse avec de rares xénocristaux d'olivine et de socle, des phénocristaux d'olivine et de clinopyroxène, des microphénocristaux d'olivine, clinopyroxène et de plagioclase. Ils contiennent également une mésostase composée de microlites de plagioclase, de clinopyroxène, de minéraux opaques de taille moyenne d'environ 7  $\mu\text{m}$  et de verre. La taille des grains de magnétite varie peu le long du prisme (8  $\mu\text{m}$  à la base et au sommet) mais elle est légèrement plus importante au contact de l'entablement avec une taille moyenne de 12  $\mu\text{m}$ . Les échantillons contiennent de 2 à 4 % de minéraux opaques et une proportion plus importante de phénocristaux d'olivine et clinopyroxène que pour les échantillons de La Palisse, en moyenne 34 %, avec des valeurs plus élevées à l'approche de l'entablement (36 %).

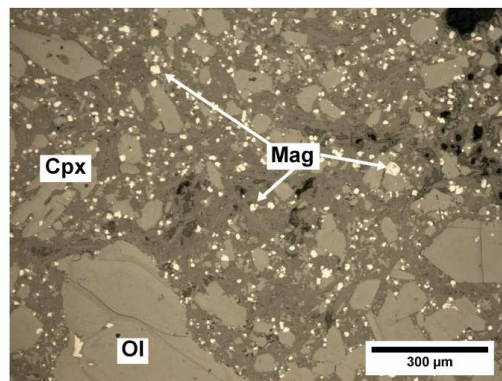
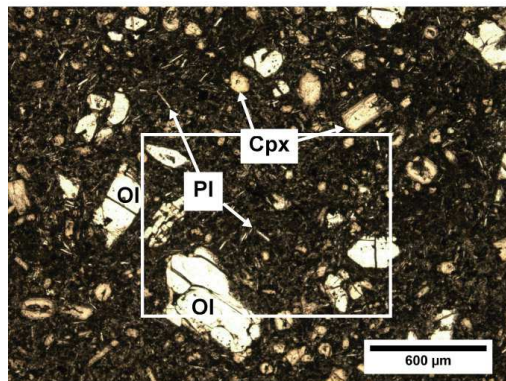




#### Composition modale:

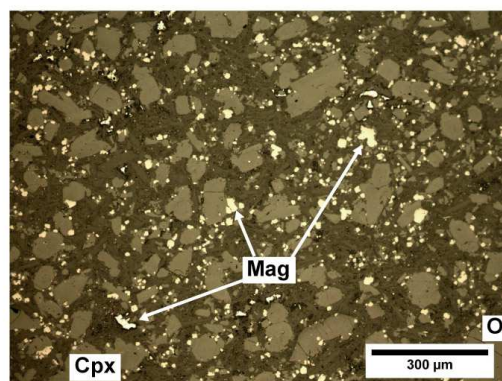
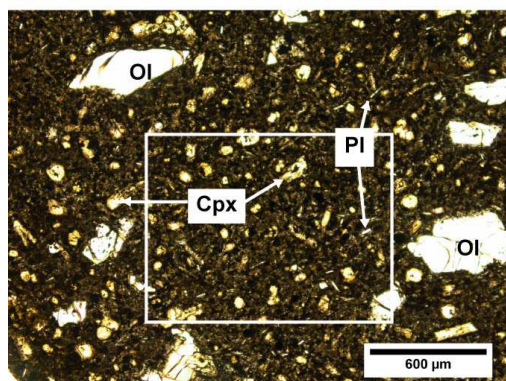
- Phénocristaux d'olivine et clinopyroxène: 36%
- Microphénocristaux de plagioclase: <1%
- Mésostase: 63 %  
dont 4 % de magnétite.

Au contact avec l'entablement



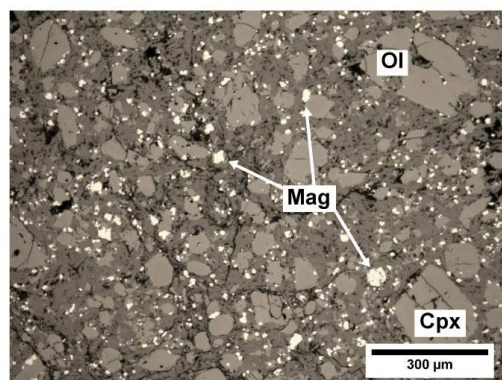
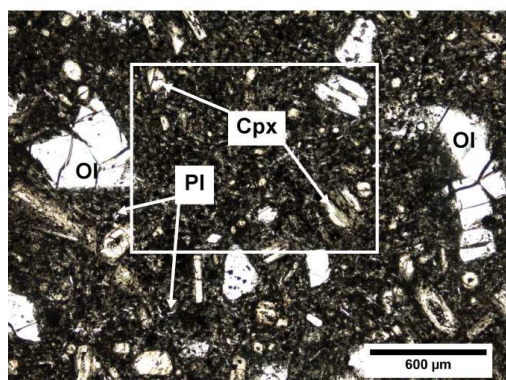
- Phénocristaux d'olivine et clinopyroxène: 37%
- Microphénocristaux de plagioclase: 1%
- Mésostase: 62 %  
dont 3 % de magnétite.

Sommet de la colonne



- Phénocristaux d'olivine et clinopyroxène: 32%
- Microphénocristaux de plagioclase: 1%
- Mésostase: 67 %  
dont 3 % de magnétite.

Milieu de la colonne



- Phénocristaux d'olivine et clinopyroxène: 32%
- Microphénocristaux de plagioclase: <1%
- Mésostase: 67 %  
dont 2 % de magnétite.

Base de la colonne

Figure 3- 7 : Observation au microscope optique en LPNA (à gauche) et en LR (à droite) des lames minces issues de différents niveau du prisme de Saint-Arcons-d'Allier. Ol : olivine, Cpx : clinopyroxène, Pl : plagioclase, Mag : magnétite. La composition modale est estimée à partir de l'analyse d'image obtenue grâce au logiciel *Image J*

La mésostase, composée de microlites de plagioclase, de clinopyroxène et de minéraux opaques, est en proportion moyenne de 65 %, avec des proportions légèrement plus faibles au contact de l'entablement (62%). La texture est rarement fluidale et les microphénocristaux de plagioclase sont bien moins nombreux que pour les échantillons de la coulée de La Palisse. Les différences texturales et de composition minéralogique sont donc relativement faibles entre la base du prisme et le contact avec l'entablement pour les échantillons prélevés sur la coulée de Saint-Arcons-d'Allier.

## 2. Étude géochimique

### 2.1. Composition en éléments majeurs

Les analyses géochimiques sur roche totale ont été réalisées sur des poudres fines issues des spécimens carottés sur le terrain. La composition chimique en éléments majeurs et en traces est obtenue par fluorescence X (XRF, Bruker SRS 3400, ENSMSE), à partir de perles lourdes confectionnées avec 1,3 g d'échantillon auxquels s'ajoutent 1,3 g de nitrate de Lithium ( $\text{LiNO}_3$ ) et 6,5 g du mélange Tétraborate de Lithium ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) 20% et Méta borate de Lithium ( $\text{LiBO}_2$ ) 80%. Les compositions de tous les échantillons analysés sont présentées en *annexe II*, les gammes de variations des éléments majeurs reportés dans les diagrammes des *Figure 3- 8 et Figure 3- 9* sont indiquées dans le *Tableau 3- 1*, ainsi que le nombre d'échantillons analysés (N). La déviation par rapport au standard de chaque élément est précisée dans l'*annexe II*.

Majeurs		SiO <sub>2</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	CaO (%)	K <sub>2</sub> O (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)
<b>La Palisse</b>	N							
Pseudo-colonnade	13	45,65 - 45,97	<b>2,36 - 2,44</b>	<b>13,76</b> - 14,17	8,51 - <b>9,33</b>	9,17 - 9,42	<b>1,56</b> - 2,02	0,85 - 0,88
Zone à débit planaire	14	<b>45,44</b> - 45,81	2,39 - 2,44	13,93 - <b>14,26</b>	<b>8,34</b> - 9,04	<b>9,15</b> - 9,44	1,95 - <b>2,13</b>	0,87 - 0,91
Entablement	3	45,55 - 45,69	2,39 - 2,41	14,03 - 14,10	8,76 - 9,09	9,34 - 9,37	1,98 - 2,10	0,88 - 0,89
Colonnade	13	45,64 - <b>46,09</b>	2,36 - 2,43	13,79 - 14,08	8,56 - 9,42	9,21 - <b>9,46</b>	1,94 - 2,05	<b>0,84</b> - 0,89
<b>Saint-Arcons-d'Allier</b>								
Contact entablement	3	45,23 - <b>45,47</b>	2,64 - <b>2,68</b>	13,94 - <b>14,04</b>	<b>9,18</b> - 9,48	10,09 - 10,21	<b>1,59</b> - 1,61	0,67 - <b>0,70</b>
Sommet prisme	3	45,03 - 45,10	2,62 - 2,66	13,77 - 13,93	9,44 - 9,69	10,10 - <b>10,22</b>	1,69 - 1,74	0,65 - 0,68
Milieu prisme	3	<b>44,85</b> - 45,08	<b>2,56</b> - 2,58	<b>13,69</b> - 13,89	9,90 - <b>9,98</b>	<b>10,04</b> - 10,14	1,72 - 1,75	0,65
Base prisme	4	44,95 - 45,12	2,57 - 2,59	13,72 - 13,80	9,72 - 9,85	10,06 - 10,19	1,74 - <b>1,76</b>	<b>0,64</b> - 0,66
Traces		Ni (ppm)	Sr (ppm)	Ba (ppm)	Ti/V			
<b>La Palisse</b>	N							
Pseudo-colonnade	13	<b>145 - 488</b>	930 - 961	<b>742</b> - 794	117 - <b>125</b>			
Zone à débit planaire	14	148 - 386	938 - <b>987</b>	773 - <b>812</b>	118 - 125			
Entablement	3	167 - 199	959 - 964	779 - 794	118 - 119			
Colonnade	13	152 - 212	<b>920</b> - 954	752 - 789	<b>115</b> - 125			
<b>Saint-Arcons-d'Allier</b>								
Contact entablement	3	<b>160</b> - 172	832 - <b>838</b>	606 - <b>642</b>	110 - <b>115</b>			
Sommet prisme	3	176 - 191	819 - 825	612 - 621	110 - 114			
Milieu prisme	3	193 - <b>339</b>	<b>780</b> - 787	<b>572</b> - 581	110 - 111			
Base prisme	4	182 - 338	781 - 787	577 - 612	<b>108</b> - 113			

Tableau 3- 1 : Gammes de variations des compositions en éléments majeurs et traces normalisés à 100 des échantillons issus des différents niveaux des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier, mesurés par Fluorescence X. N est le nombre d'échantillons analysés pour chaque niveau. Les chiffres en gras indiquent les teneurs minimales et maximales de chaque élément pour les deux coulées.



La composition chimique en silice et en éléments alcalins (*Figure 3- 8*) indique que les laves de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier se situent dans le champ des basanites selon la classification de Lebas et al. (1986). Elles rentrent dans les gammes de composition observées sur les basaltes alcalins et les basanites du Massif Central (*Figure 3- 8*) (Liotard et al. 1983; 1988; Bourdier & Cantagrel 1983; Chauvel & Jahn 1984; Dautria et al. 2004; Pastre et al. 2004). Pour les échantillons de La Palisse, la teneur en silice varie de 45,4 à 46,1 poids % (indiqué % par la suite) et la teneur en alcalins ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) varie de 6,1 à 7,0%. Pour les échantillons de Saint-Arcons-d'Allier, la teneur en silice est comprise entre 44,9 et 45,5% et la teneur en alcalins est comprise entre 5,5 et 6,0%. La coulée de Saint-Arcons-d'Allier est donc un peu moins alcaline et un peu moins différenciée que celle de La Palisse.

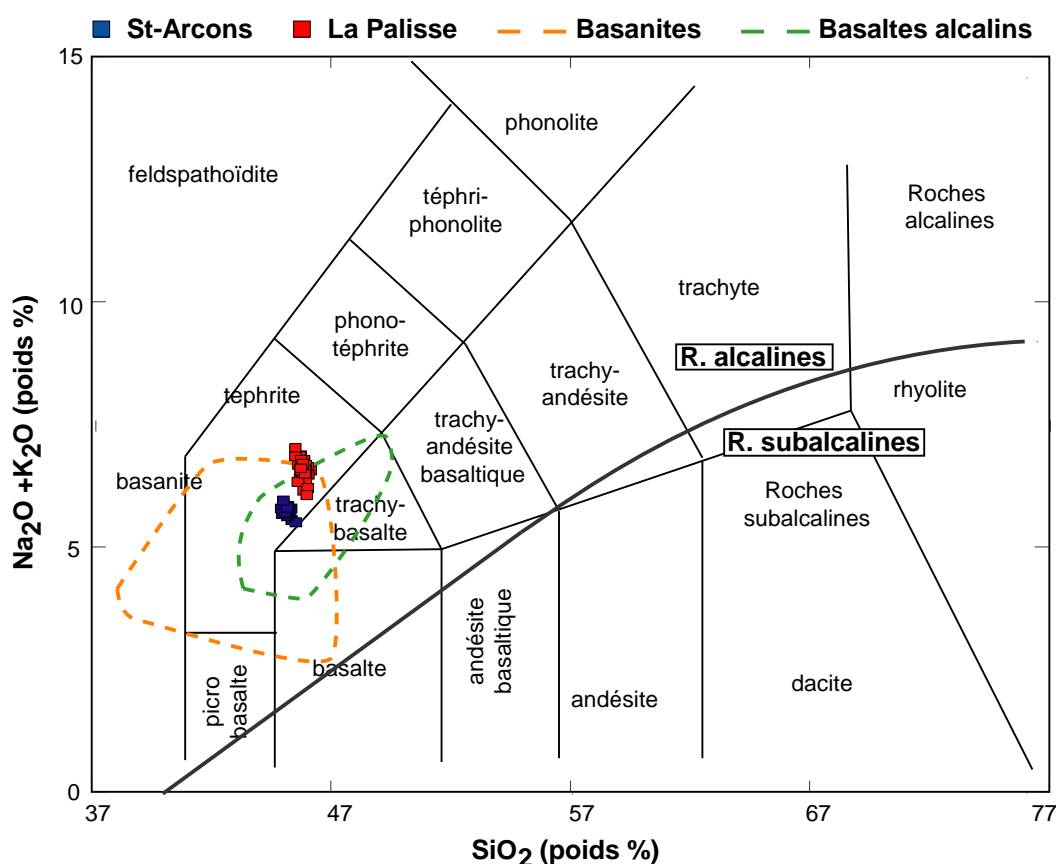


Figure 3- 8 : Diagramme Alcalins-Silice (TAS) des échantillons de La Palisse (carrés rouges) et de Saint-Arcons-d'Allier (carrés bleus) selon la classification internationale (Lebas et al. 1986). La ligne limitant le domaine des laves alcalines du domaine des laves subalcalines est celle donnée par MacDonald et Katsura (1964). Les champs délimités par les pointillés représentent des données de la littérature sur des basaltes alcalins et basanites du Massif Central. (Liotard et al. 1983; 1988; Bourdier & Cantagrel 1983; Chauvel & Jahn 1984; Dautria et al. 2004; Pastre et al. 2004)

Le rapport  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  varie de 2,2 à 2,9 pour les échantillons de la coulée de La Palisse et de 2,3 à 2,6 pour ceux de Saint-Arcons-d'Allier. Ce paramètre indique le caractère alcalin sodique de ces laves ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 2$ ), avec une teneur plus élevée en sodium pour la coulée de Saint-Arcons-d'Allier. Le paramètre de différenciation [Mg] (ou Mg-number) est calculé à partir de  $\text{Mg}^{2+}$  et de  $\text{Fe}^{2+}$  par la formule suivante :

$$[\text{Mg}] = \text{Mg}^{2+} / (\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$$

en considérant un rapport  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO} = 0,2$  (Sun & Hanson 1975; Briot 1988). Le [Mg] pour les échantillons de La Palisse varie de 60 à 63 et de 62 à 64 pour les échantillons de Saint-Arcons-d'Allier. Ce paramètre montre que les échantillons issus de la coulée de La Palisse sont légèrement plus différenciés que ceux de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier (Maury et al, 1980). Ceci s'observe également sur le diagramme TAS (*Figure 3- 8*), qui indique que la gamme de composition de la coulée de La Palisse s'étend vers des teneurs plus élevées en  $\text{SiO}_2$  par rapport à celle de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier.

Les compositions en éléments majeurs des échantillons des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier ont également été reportées dans des diagrammes de type Harker (*Figure 3- 9*). Afin de limiter les erreurs dues à la masse d'échantillon pesée lors de la fabrication de la perle, les éléments majeurs sont normalisés à 100 et le coefficient de normalisation est appliqué aux éléments en trace. L'élément  $\text{Na}_2\text{O}$  est exclu des diagrammes car étant plus volatil que les autres éléments majeurs, les teneurs observées peuvent être biaisées lors de la mesure sur perles. La comparaison des deux coulées permet ainsi de constater que les échantillons de la coulée de La Palisse et ceux de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier forment deux groupes bien distincts, notamment pour les éléments  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{P}_2\text{O}_5$  (*Figure 3- 9*).

Pour la coulée de Saint-Arcons-d'Allier, le nombre d'échantillons étant moindre que pour la coulée de La Palisse, les échantillons issus des différents niveaux du prisme sont plus visibles que pour la coulée de La Palisse. Les diagrammes de Harker montrent que les échantillons du milieu et de la base du prisme présentent des teneurs en  $\text{MgO}$  plus élevées (respectivement de  $9,9 < \text{MgO} \% < 10$  et  $9,7 < \text{MgO} \% < 9,9$ ) que les échantillons du sommet du prisme et que ceux issus de la colonnade au contact de l'entablement (respectivement  $9,4 < \text{MgO} \% < 9,7$  et  $9,2 < \text{MgO} \% < 9,5$ ). Les teneurs en  $\text{SiO}_2$  sont légèrement plus élevées pour les teneurs en  $\text{MgO}$  les plus faibles ( $45,5 \%$  pour les échantillons de la colonnade au contact de l'entablement) et diminuent quand les teneurs  $\text{MgO}$  augmentent ( $44,9 \%$  pour les échantillons du milieu du prisme). La même corrélation négative est observée pour  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  et  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Seul  $\text{K}_2\text{O}$  montre une tendance inverse avec les teneurs les plus faibles pour les échantillons de la colonnade au contact de l'entablement ( $\text{K}_2\text{O} \% = 1,6$ ). Entre la base et le sommet du prisme, les teneurs en  $\text{K}_2\text{O}$  varient peu : de 1,7 à 1,8 %.

Pour la coulée de La Palisse, les échantillons analysés étant plus nombreux, le détail des données est présenté sur la *Figure 3- 10* pour une meilleure discrimination des différents niveaux de la coulée: la gamme de composition chimique de chaque niveau de la coulée est représentée par une zone colorée. Les échantillons de la colonnade montrent les teneurs en  $\text{MgO}$  les plus élevées ( $9,21 < \text{MgO} \% < 9,46$ ) et les échantillons de la zone à débit planaire les plus faibles ( $9,15 < \text{MgO} \% < 9,42$ ). Cependant les teneurs en  $\text{MgO}$  se recoupent et ne permettent pas de bien distinguer les différents niveaux de la coulée. Les éléments  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{TiO}_2$  ne permettent de mettre en évidence des compositions spécifiques à chaque niveau. Les teneurs en  $\text{SiO}_2$  varient peu ( $45,6 < \text{SiO}_2 \% < 46,1$ ) et sont indépendantes de l'emplacement des échantillons dans la coulée. Cependant, le diagramme  $\text{SiO}_2$  en fonction de  $\text{MgO}$  montre que les deux zones correspondant aux échantillons de la colonnade et de la zone à débit planaire ne se recoupent quasiment pas, alors que la zone des échantillons de l'entablement est confondue avec celle de la zone à débit planaire et que celle de la pseudo-colonnade avec la zone de la colonnade. Les échantillons de la pseudo-colonnade présentent

les teneurs en  $K_2O$  les plus faibles ( $1,6 < K_2O \% < 2,0$ ) et les échantillons de la zone à débit planaire les plus élevées ( $2,0 < K_2O \% < 2,1$ ). Les variations de  $P_2O_5$  varient peu (de 0,8 à 0,9 %) et ne permettent pas de distinguer les échantillons des différents niveaux de la coulée. En conclusion, les éléments majeurs ne permettent pas d'isoler une composition spécifique à chaque niveau de la coulée de La Palisse.

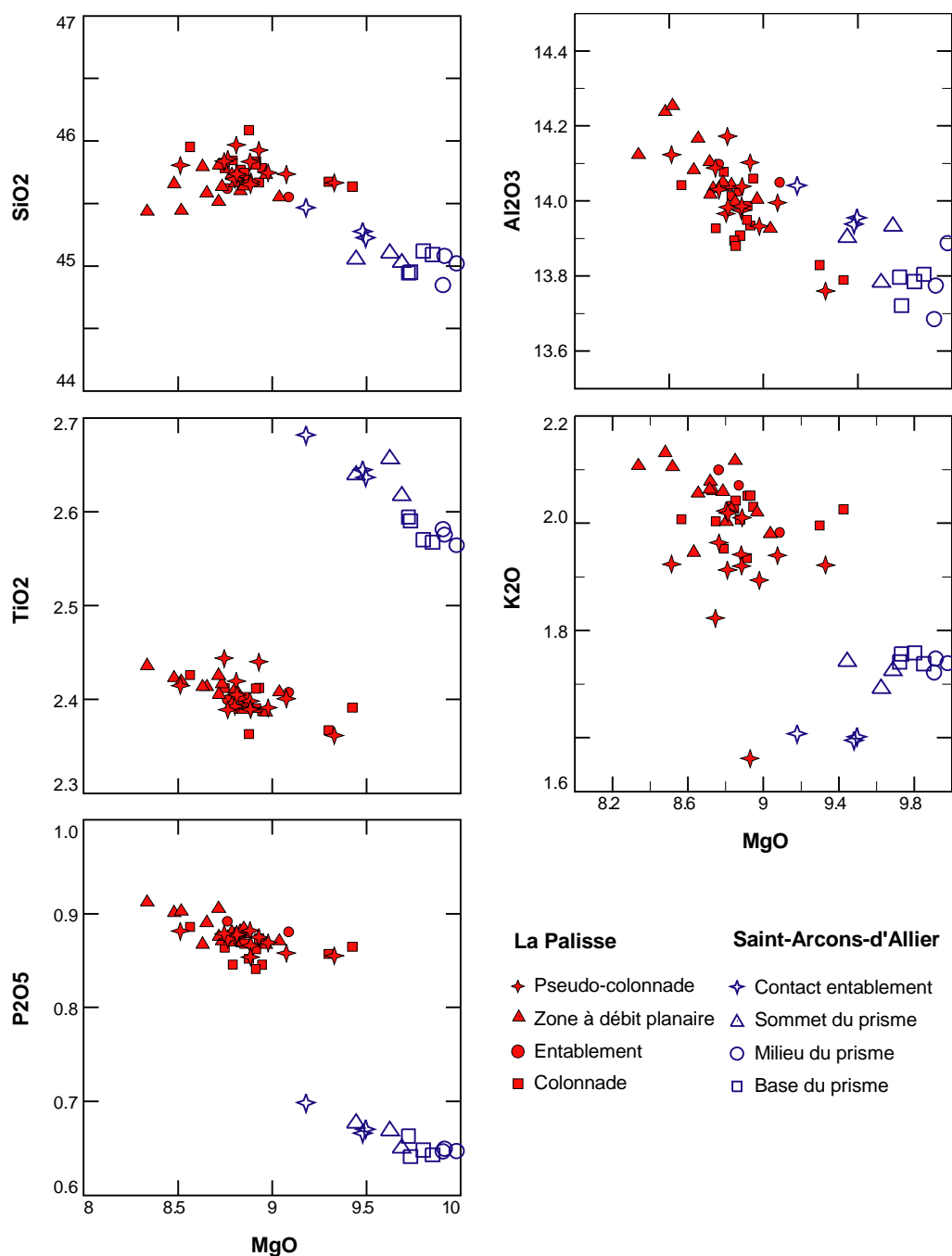


Figure 3- 9 : Diagrammes de la composition en éléments majeurs  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $K_2O$  et  $P_2O_5$  normalisées à 100 en fonction de  $MgO$ , des échantillons issus des différents niveaux des coulées de La Palisse (rouge) et de Saint-Arcons-d'Allier (bleu).

## 2.2. Composition en éléments en traces et en terres rares

### 2.2.1. Diagrammes de Harker

Les éléments en traces Ni, Sr, Ba ainsi que les rapports Ti/V nous permettent de bien distinguer les échantillons des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier (en particulier les éléments Sr et Ba) (*Figure 3- 11*). Pour la coulée de Saint-Arcons-d'Allier, les échantillons présentent des teneurs en éléments en traces spécifiques à leur emplacement : de la base du prisme vers le sommet ainsi que de la colonnade au contact de l'entablement. Les teneurs en Ni sont plus élevées pour les échantillons de la base et du milieu du prisme (respectivement  $182 < \text{Ni (ppm)} < 338$  et de  $193 < \text{Ni (ppm)} < 339$ ), comparées à celles des échantillons du sommet du prisme et de la colonnade au contact de l'entablement (respectivement  $176 < \text{Ni (ppm)} < 191$  et de  $160 < \text{Ni (ppm)} < 172$ ). Les deux points correspondant aux teneurs en Ni les plus élevées sont les échantillons STA-4-1bot et STA-4-4A (*Annexe II*). Les éléments en trace Sr et Ba ainsi que le rapport Ti/V indiquent des corrélations inverses à celles du Ni avec des valeurs plus faibles pour les échantillons contenant le plus de MgO. De plus, le diagramme Sr en fonction de MgO montre deux groupes bien distincts entre les échantillons de la base et du milieu du prisme et ceux du sommet du prisme et de la colonnade au contact de l'entablement.

Pour la coulée de La Palisse, les éléments en traces, comme les éléments majeurs ne permettent pas de mettre en évidence des compositions spécifiques pour chaque niveau de la coulée. Les teneurs en Ni varient de 148 à 488 ppm avec des gammes de variations comparables pour les 4 niveaux de la coulée en dehors des deux points qui correspondent aux teneurs les plus élevées (08tb100Bot et 08tb54Bot). Cependant, une tendance similaire à celle des échantillons de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier est observée avec des teneurs en Ni élevées pour les teneurs en MgO élevées. Les éléments en traces Sr, Ba et le rapport Ti/V montrent la même corrélation négative avec MgO que les échantillons de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier, sans distinction entre les échantillons des différents niveaux de la coulée.

Les diagrammes des éléments majeurs et traces en fonction de MgO permettent ainsi de mettre en évidence les différents niveaux du prisme de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier alors que pour les différents niveaux de la coulée de La Palisse, peu de différences de composition chimique sont observées.

### 2.2.1. Les spectres de terres rares

La technique d'analyse des teneurs en terres rares (REE) que nous avons employée est l'ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy ; Bruker SRS 3400, ENSMSE), sur solutions séparées et pré-concentrées par chromatographie sur résines échangeuses d'ions. La mise en solution de la poudre de roche est réalisée par attaques acides au laboratoire LMV-TL (UJM). La première étape consiste à mélanger 250 mg d'échantillon avec 1ml d' $\text{HNO}_3$  pur et 2 ml d' $\text{HF}$  dans des Savillex en téflon, la seconde étape est d'ajouter 200  $\mu\text{l}$  d' $\text{HClO}_4$  et 2 ml d' $\text{HNO}_3$  7N, puis la suivante 5 ml d' $\text{HNO}_3$  6N et 5 ml d' $\text{HCl}$  2N. Les solutions sont centrifugées dans des tubes à essai dans lequel on pipette le surnageant, le reste de la solution est mélangé avec 2 ml d'un mélange

d'acide borique ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) et d' $\text{HCl}$  2N. Si les solutions ne présentent plus de résidu, elles sont prêtes à être passées sur les colonnes de résine. Une première élution permet d'éliminer les cations indésirables en introduisant dans les colonnes 50 ml d' $\text{HCl}$  2N. Une fois que toute la solution est passée à travers les colonnes, la fraction des terres rares est alors récupérée en chargeant 70 ml d' $\text{HNO}_3$  5,5 N. Ces solutions concentrées en terres rares sont évaporées à sec, puis dissoutes dans 8 ml d' $\text{HCl}$  2N pour l'analyse à l'ICP-AES.

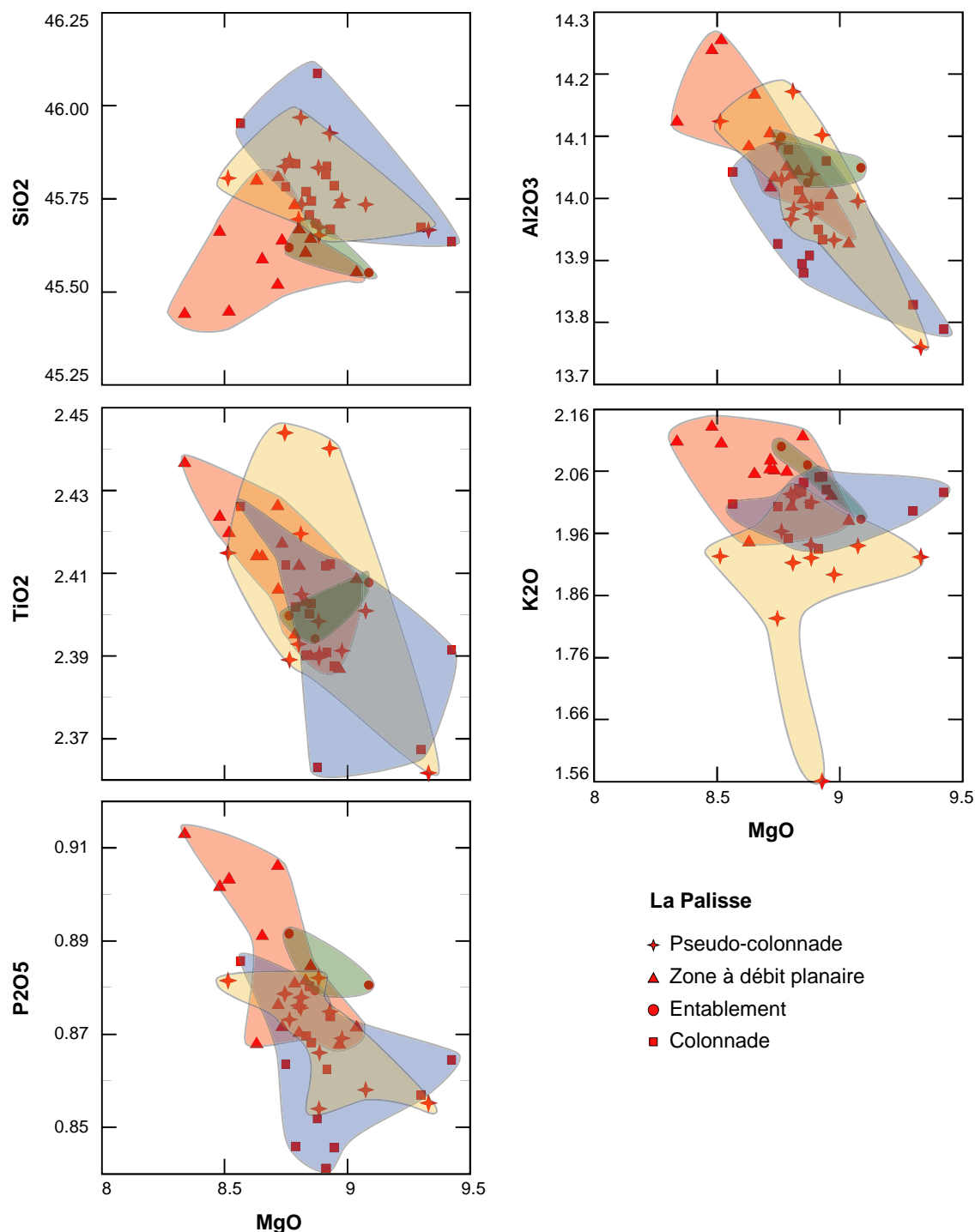


Figure 3- 10 : Diagrammes de Bowen des éléments  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{P}_2\text{O}_5$  des échantillons issus des différents niveaux de la coulée de La Palisse. La gamme de composition chimique de la colonnade correspond à la zone bleue, celle de l'entablement à la zone verte, celle de la zone à débit planaire à la zone rouge et celle de la pseudo-colonnade à la zone jaune.

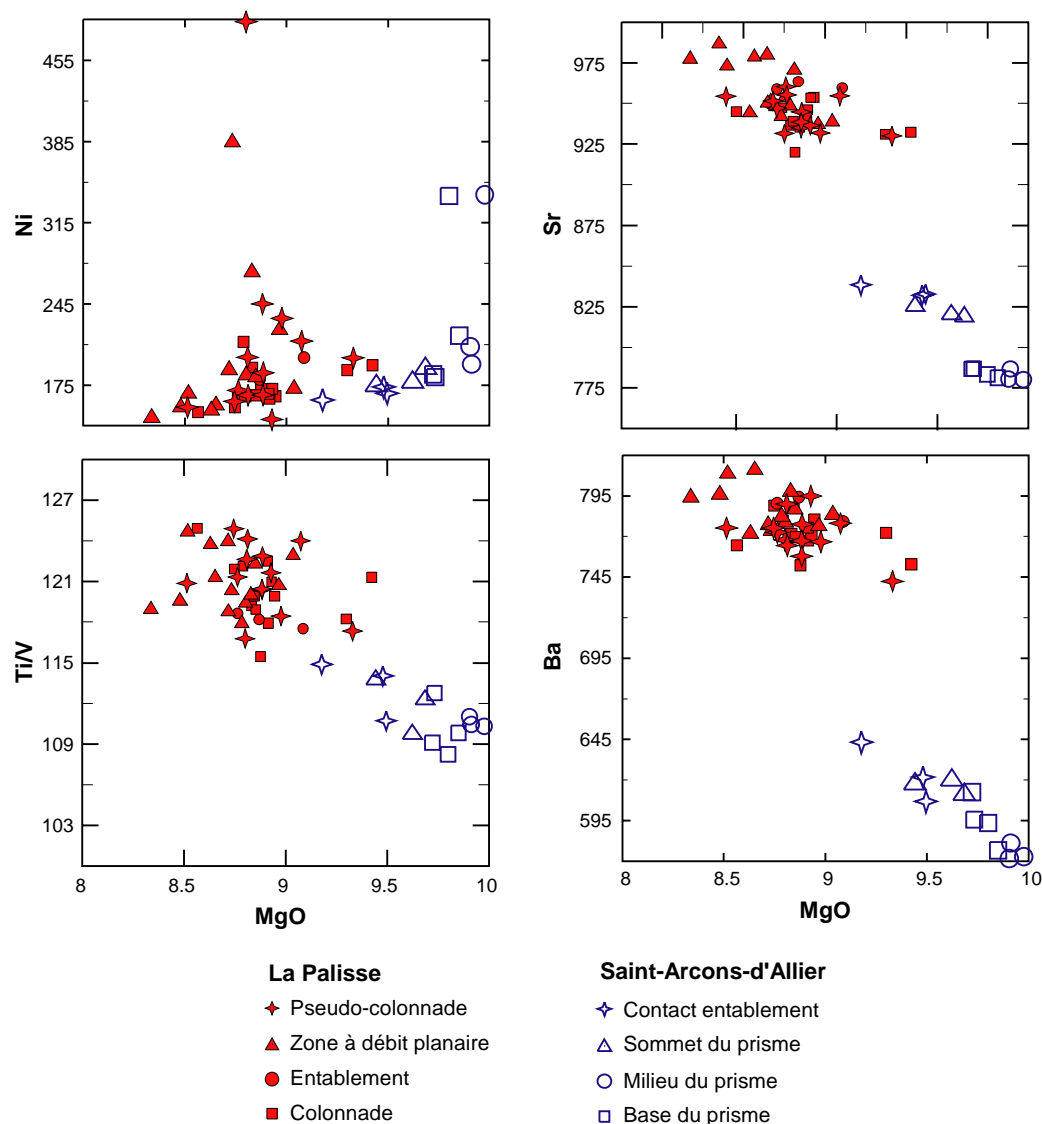


Figure 3- 11 : Diagrammes des éléments traces Ni, Sr et Ba et du rapport Ti/V en fonction de MgO des échantillons issus des différents niveaux des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier.

## 2.2.2. Les spectres de terres rares

La technique d'analyse des teneurs en terres rares (REE) que nous avons employée est l'ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy ; Bruker SRS 3400, ENSMSE), sur solutions séparées et pré-concentrées par chromatographie sur résines échangeuses d'ions. La mise en solution de la poudre de roche est réalisée par attaques acides au laboratoire LMV-TL (UJM). La première étape consiste à mélanger 250 mg d'échantillon avec 1ml d' $\text{HNO}_3$  pur et 2 ml d' $\text{HF}$  dans des Savillex en téflon, la seconde étape est d'ajouter 200  $\mu\text{l}$  d' $\text{HClO}_4$  et 2 ml d' $\text{HNO}_3$  7N, puis la suivante 5 ml d' $\text{HNO}_3$  6N et 5 ml d' $\text{HCl}$  2N. Les solutions sont centrifugées dans des tubes à essai dans lequel on pipette le surnageant, le reste de la solution est mélangé avec 2 ml d'un mélange d'acide borique ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) et d' $\text{HCl}$  2N. Si les solutions ne présentent plus de résidu, elles sont prêtes à être passées sur les colonnes de résine. Une première élution permet d'éliminer les cations indésirables en introduisant dans les colonnes 50 ml d' $\text{HCl}$  2N. Une fois que toute la solution est passée à travers les colonnes, la fraction des terres rares est alors récupérée en chargeant 70 ml



d'HNO<sub>3</sub> 5,5 N. Ces solutions concentrées en terres rares sont évaporées à sec, puis dissoutes dans 8 ml d'HCl 2N pour l'analyse à l'ICP-AES.

23 échantillons issus de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier et 51 pour la coulée de La Palisse ont été analysés pour leur teneur en terres rares (REE) (*Annexe II*). Les résultats sont présentés sous forme de spectres de terres rares normalisés aux chondrites pour les éléments La, Ce, Nd, Sm, Eu et Yb (*Figure 3- 12*), dont les déviations par rapport au standard sont précisées en *annexe II*. Les données de la littérature (Liotard et al. 1983; 1988; Bourdier & Cantagrel 1983; Chauvel & Jahn 1984; Dautria et al. 2004; Pastre et al. 2004) sur les terres rares de basaltes alcalins et de basanites du Massif Central sont également présentées. Les spectres de REE des deux coulées sont similaires et présentent un enrichissement en terres rares légères (LREE ; plus de 200 fois la teneur des chondrites pour La) par rapport aux terres rares lourdes (HREE ; plus de 10 fois la teneur des chondrites pour Yb). Ils sont contenus dans la zone de recoupement des basaltes alcalins et des basanites du Massif Central. Les données de la littérature montrent des rapports La/Yb qui varient de 5,59 à 599,08 pour les basaltes alcalins et de 3,42 à 41,74 pour les basanites. Les coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier montrent des rapports La/Yb variant de respectivement de 20,96 à 31,14 et de 20,96 à 26,94 (*Annexe II*). Les gammes de variations de La/Yb de ces coulées sont donc plus proches de celles des basanites.

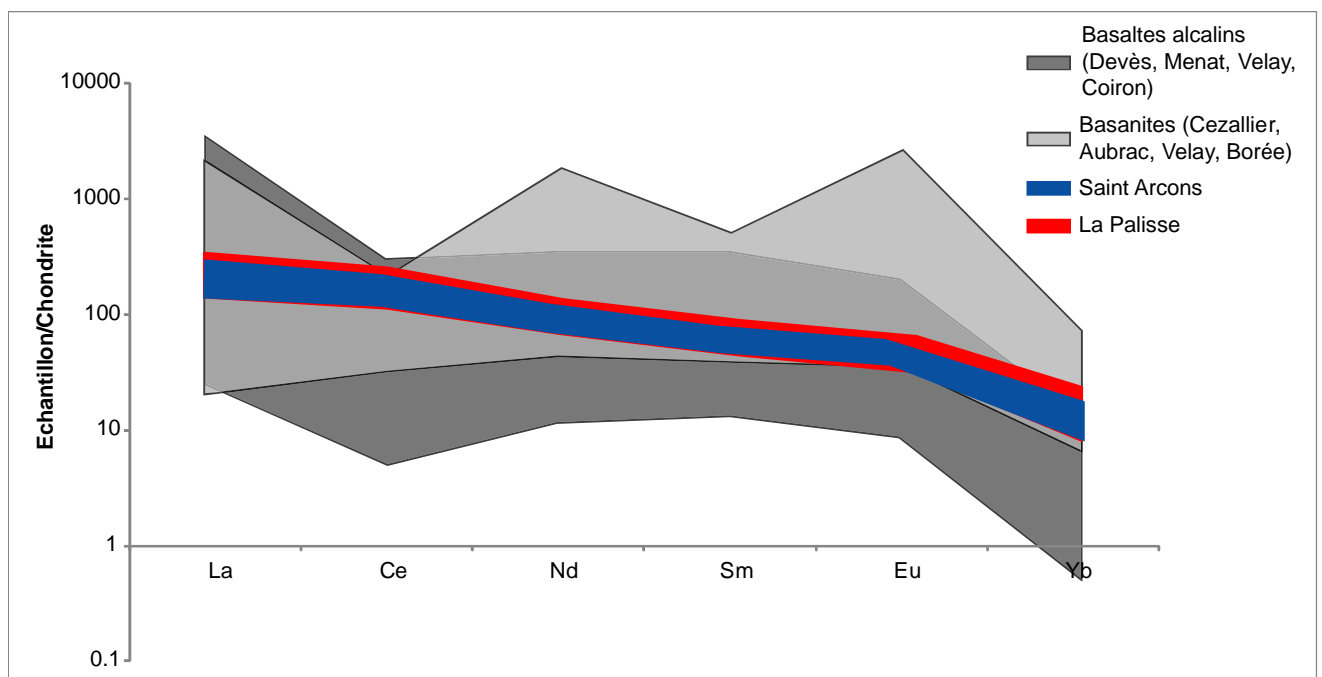


Figure 3- 12 : Spectres des terres rares normalisés aux chondrites des données de la littérature en gris (voir texte), des échantillons de Saint-Arcons-d'Allier (bleu) et de La Palisse (rouge).

Afin de discuter des différences de composition chimique en terres rares entre les différents niveaux dans les deux coulées, le détail des spectres de terres rares pour chaque échantillon est présenté en *Figure 3- 13*. Les gammes de variations des terres rares des échantillons des différents niveaux des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier sont également indiquées dans le *Tableau 3- 2*.

Pour la coulée de La Palisse (*Figure 3- 13a*), les spectres des 40 échantillons montrent un comportement globalement similaire. Seul l'échantillon 75bot, situé dans la pseudo-colonnade, se détache du groupe avec des concentrations en terres rares plus faibles (*Annexe II*). Les échantillons de la pseudo-colonnade montrent les gammes de variations les plus étendues par rapport aux autres échantillons de la coulée (*Tableau 3- 2*). Les gammes de variations des échantillons de la colonnade, de l'entablement et de la zone à débit planaire sont semblables.

Pour la coulée de Saint-Arcons-d'Allier (*Figure 3- 13b*), les spectres des 17 échantillons sont comparables à ceux des échantillons de La Palisse avec un enrichissement en terres rares légères (200 fois la valeur des chondrites) par rapport aux terres rares lourdes (10 fois la valeur des chondrites) et pas d'anomalies négatives en Eu. Les différences de teneurs entre les différents échantillons sont relativement faibles. Seul l'échantillon STA-1-2D au sommet du prisme se détache du groupe avec des teneurs en terres rares un peu plus élevées.

	N	La(ppm)	Ce(ppm)	Nd(ppm)	Sm(ppm)	Eu(ppm)	Yb(ppm)	La/Yb
<b>La Palisse</b>								
Pseudo-colonnade	12	38 - 63	82 - 116	36 - 50	7 - 10	2 - 3	2	21 - 31
Zone à débit planaire	13	60 - 63	110 - 119	48 - 51	9 - 10	3	2	24 - 31
Entablement	3	60 - 62	112 - 115	49 - 50	9	3	2	30 - 31
Colonnade	12	58 - 62	106 - 117	46 - 50	9 - 10	2 - 3	2	24 - 30
<b>Saint-Arcons-d'Allier</b>								
Contact entablement	3	47 - 48	92 - 95	42	8 - 9	3	2	21 - 26
Sommet prisme	4	48	93 - 94	42 - 43	8 - 9	2	2	21 - 27
Milieu prisme	4	47 - 48	91 - 92	41 - 42	8	3	2	22 - 27
Base prisme	6	46	89 - 90	39 - 41	8	3	2	23 - 27

Tableau 3- 2 : Gammes de variations des terres rares des différents niveaux des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier, analysées par ICP-AES. Les variations des rapports terres rares légères sur terres rares lourdes La/Yb sont indiqués.

## 2.1. Composition en éléments majeurs des minéraux.

Les compositions chimiques des clinopyroxènes, plagioclases, olivines et magnétites des laves de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier ont été mesurées à la microsonde électronique CAMECA SX 100 du Laboratoire Magmas et Volcans de l'Université Blaise Pascal de Clermont II avec une tension d'alimentation de 15 kV (*Annexe III*). Les formules structurales ainsi que les proportions des pôles purs ont été calculées pour chaque phase minérale, dont les gammes de variations sont indiquées dans le *Tableau 3- 3*.

Les compositions des cœurs des clinopyroxènes des laves de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier sont reportées dans un diagramme ternaire wollastonite (Wo)- enstatite (En)- ferrosilite (Fs) (*Figure 3- 14a*). Selon la nomenclature de Morimoto (1988), ces clinopyroxènes sont essentiellement des diopsides.

Pour la coulée de Saint-Arcons-d'Allier, les proportions en Wo varient de 43,9 à 51,8 avec des proportions légèrement plus élevées pour les échantillons issus de la base du prisme ( $43,9 < Wo < 49,2$ ) que pour les échantillons issus du sommet ( $45,8 < Wo < 51,8$ ) (*Tableau 3- 3*). Les variations des proportions en En sont plus importantes (22,9 à 44,9), avec une gamme de variation un peu plus importante pour les échantillons issus de la base du prisme ( $22,9 < En < 44,9$ ) que pour les échantillons du sommet ( $29,4 < En < 44,3$ ). Les proportions en Fe sont faibles ( $9,3 < Fs < 26,7$ ).

Celles-ci sont légèrement plus élevées pour les échantillons du sommet du prisme ( $10,7 < En < 26,7$ ) que pour les échantillons de la base ( $9,3 < Fs < 25,4$ ). Dans le diagramme ternaire Wo-En-Fs (Figure 3- 14b), deux zones correspondant aux deux groupes d'échantillons (base et sommet du prisme) se distinguent. Pour les échantillons de la base du prisme, la proportion Wo tend à augmenter quand la proportion de En diminue. Pour les échantillons du sommet du prisme, la même tendance est observée, à l'exception d'un clinopyroxène dont la proportion Wo et En est plus basse que celle des autres échantillons.

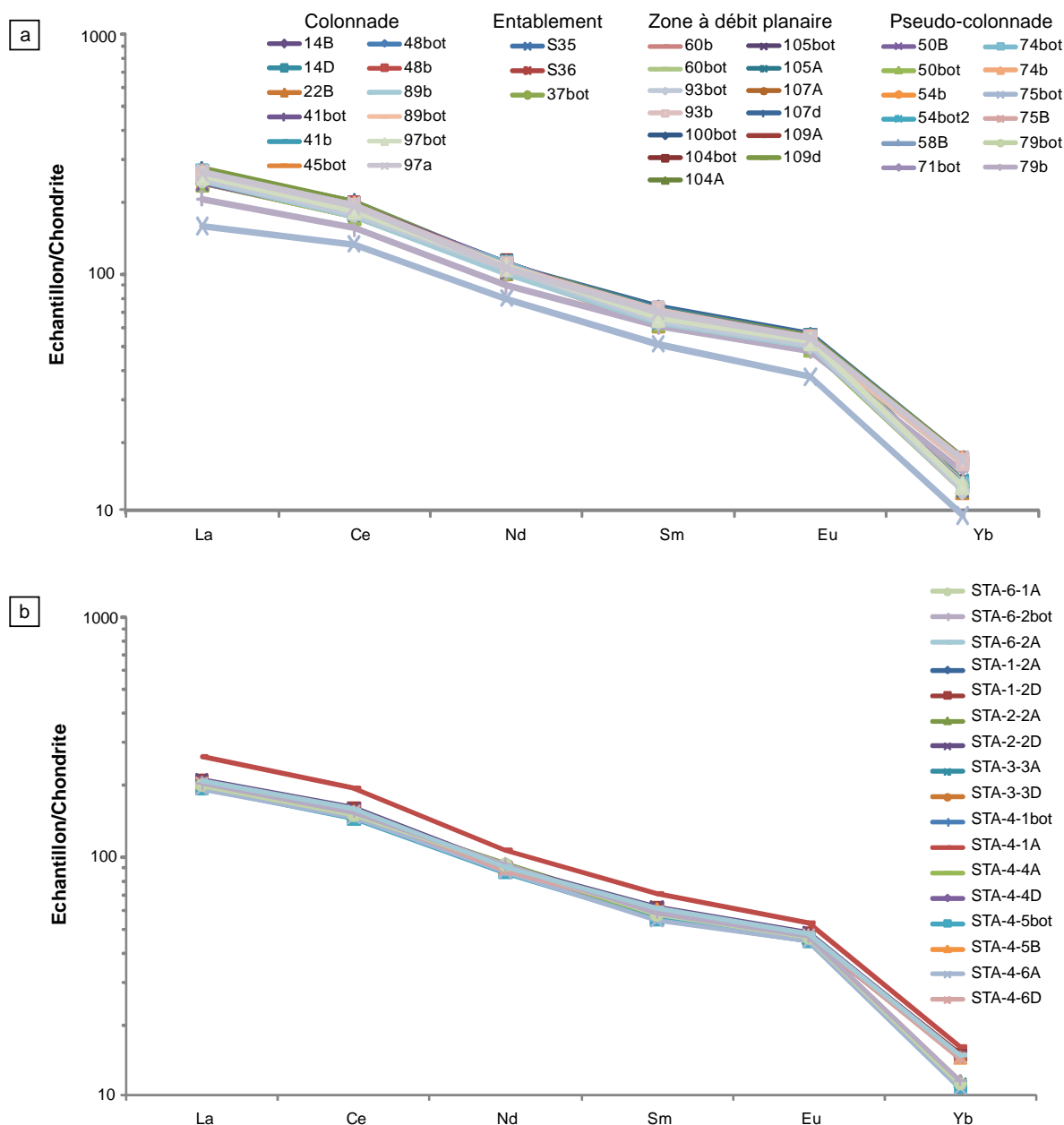


Figure 3- 13 : Spectres des terres rares normalisés aux chondrites des échantillons issus (a) de la coulée de La Palisse, avec l'origine des échantillons précisée dans la légende ; et (b) de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier, avec les échantillons de la base vers le sommet de la colonne indiqués de bas en haut de la légende.

	Clinopyroxènes				Plagioclases			
	N	Wo	En	Fs	N	An	Ab	Or
<b>La Palisse</b>								
Pseudo-colonnade	9	47,1 - 50,1	35,0 - 40,9	11,4-14,9	6	48- 53,6	44,6 - 50,4	1,6 - 1,8
Zone à débit planaire	11	46,4 - 49,3	35,6 - 42,6	10,8 - 15,4	6	50,1 - 55,2	43,2 - 47,9	1,6 - 2,7
Entablement	9	46,6 - 50,4	35,9 - 40,7	11,3 - 14,1	7	47,3 - 54,8	42,4 - 49	2,8 - 3,6
Colonnade	43	46,3 - 50,5	34,2 - 43,2	10,2 - 16	14	46,4 - 52,6	45,1 - 50,2	2,3 - 3,5
<b>Saint-Arcons-d'Allier</b>								
Sommet du prisme	5	43,9 - 49,2	29,4 - 44,3	10,7 - 26,7	7	58,3 - 62,5	35,8 - 39,6	1,6 - 4,3
Base du prisme	9	45,8 - 51,8	22,9 - 44,9	9,3 - 25,4	6	49,4 - 65,2	33,3 - 47,9	1,5 - 2,6

Tableau 3- 3 : Gammes de variations des compositions des clinopyroxènes et des plagioclases des échantillons des différents niveaux des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier. Pour les clinopyroxènes, les compositions sont exprimées en proportions des pôles wollastonite (Wo), enstatite (En) et ferrosilite (Fs). Pour les plagioclases, les compositions sont exprimées en proportions des pôles anorthite (An), albite (Ab) et orthose (Or). N est le nombre de grains analysés par niveau de chaque coulée.

Pour la coulée de La Palisse, les proportions en Wo varient de 46,3 à 50,5, avec des gammes de variations comparables pour les 4 niveaux de la coulée (*Tableau 3- 3*). Les proportions en En varient de 34,2 à 43,2, avec des gammes de variation comparables entre les échantillons de la pseudo-colonnade et de l'entablement ( $35 < \text{En} < 40,9$ ) et des gammes de variations comparables entre les échantillons de la colonnade et de la zone à débit planaire ( $34,2 < \text{En} < 43,2$ ). Les proportions de Fe varient de 10,2 à 16, ce qui correspond à la gamme de variation des échantillons de la colonnade. Les gammes de variations sont globalement comparables entre les différents niveaux de la coulée. Dans le diagramme ternaire Wo-En-Fs (*Figure 3- 14c*), les zones qui correspondent aux différents niveaux de la coulée se superposent entre elles. Les échantillons de l'entablement et de la pseudo-colonnade montrent des gammes de variations plus étroites en proportion En que pour les échantillons de la colonnade et de la zone à débit planaire, comme déjà observées pour les données du *Tableau 3- 3*. Globalement, le diagramme montre que plus la proportion de Wo augmente, plus la proportion de En diminue et ce pour tous les échantillons de la coulée de La Palisse.

Les compositions chimiques des plagioclases des laves de Saint-Arcons-d'Allier et de La Palisse sont reportées dans un diagramme ternaire anorthite (An) – albite (Ab) – orthose (Or) (*Figure 3- 15a*). Les gammes de variations des proportions des pôles sont indiquées dans le *Tableau 3- 3*. Nous observons que les plagioclases de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier sont globalement plus calciques que ceux de la coulée de La Palisse, ce qui peut être mis en parallèle avec la nature légèrement plus mafique de la lave de Saint-Arcons-d'Allier par rapport à celle de La Palisse, révélée par les analyses sur roche totale. Notons que cette différence de composition sur les plagioclases n'est pas observée au niveau de la composition des clinopyroxènes.

Pour la coulée de Saint-Arcons-d'Allier, les proportions en An des plagioclases de la base du prisme varient de 49,4 à 65,2. Dans un diagramme ternaire (*Figure 3- 15b*), la large gamme de variation de la composition chimique des plagioclases de la base du prisme de Saint-Arcons-d'Allier est due à un seul grain dont la proportion en An est plus faible (An<sub>50</sub>) que l'ensemble des grains de plagioclase. En dehors de ce point, les gammes de variation de ces deux groupes d'échantillons deviennent comparables. Cependant, les proportions en An restent plus élevées pour les échantillons de la base du prisme et les proportions en Or plus élevées pour les échantillons du sommet de la colonne. Les plagioclases du sommet du prisme présentent une gamme de variation plus restreinte

(58,3 < An < 62,5). Les proportions de Ab varient de la même manière que pour An avec une gamme de variation plus étendue pour les échantillons de la base de la colonne (33,3 < Ab < 47,9) et plus restreinte pour les échantillons du sommet du prisme (35,8 < Ab < 39,6), avec les mêmes explications que pour An. Les proportions en Or varient de 1,5 à 4,3, avec une gamme de variation de 1,5 à 2,6 pour les échantillons de la base du prisme et une gamme de variation plus étendue, de 1,6 à 4,3, pour les échantillons du sommet.

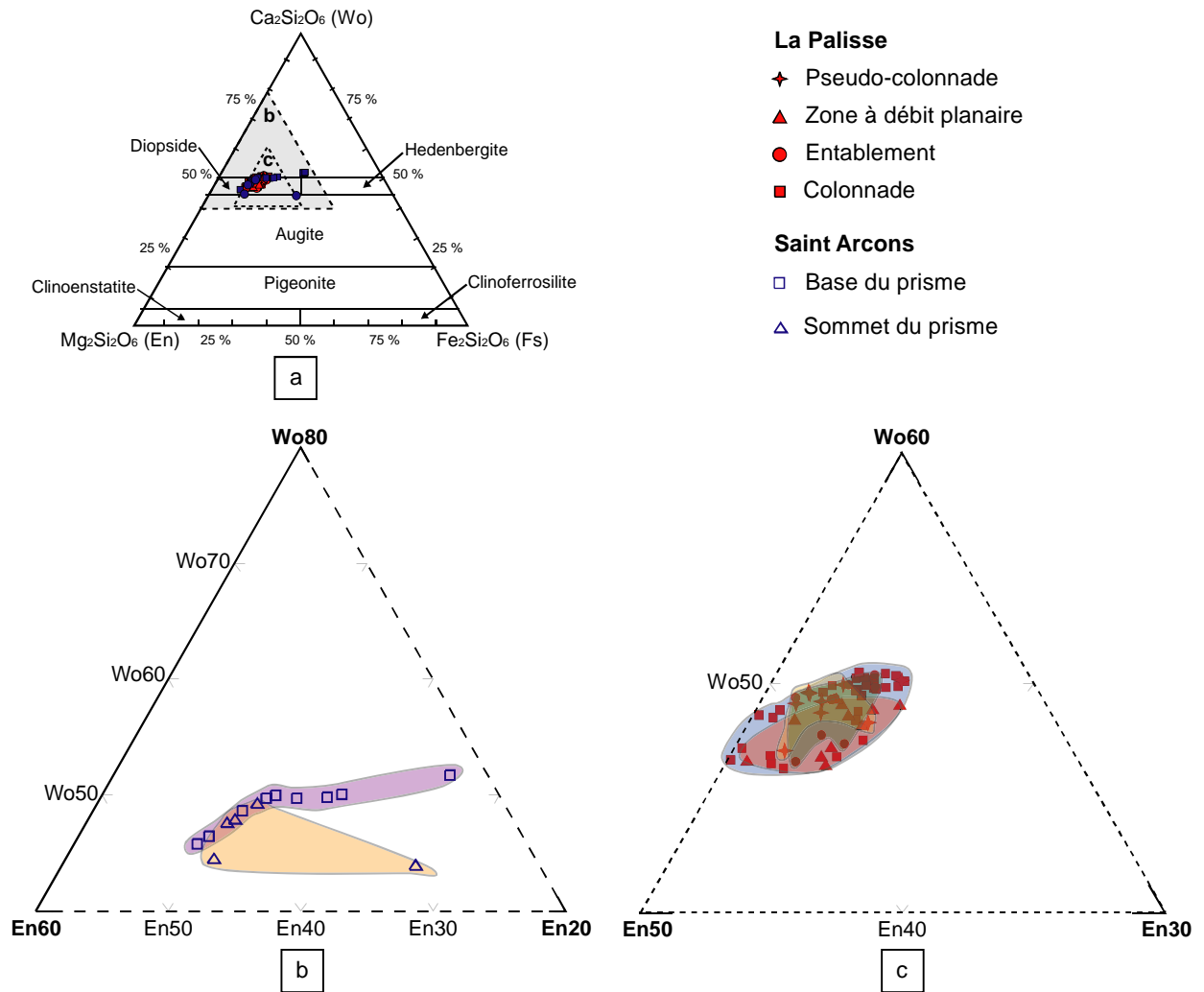


Figure 3- 14 : Compositions chimiques des clinopyroxènes des échantillons issus de la coulée de La Palisse (rouge) et de Saint-Arcons-d'Allier (bleu), obtenues par microsonde électronique. (a) Nomenclature utilisée pour décrire ces données (Morimoto, 1988). Les diagrammes ternaires présentés en (b) et (c) sont indiqués en grisé. (b) Diagramme ternaire Wo-En-Fs des échantillons de Saint-Arcons-d'Allier. La zone représentant les échantillons issus de la base du prisme est en mauve, celle correspondant au sommet du prisme est en orange. (c) Diagramme ternaire Wo-En-Fs des échantillons de La Palisse. La zone en bleu correspond aux échantillons de la colonnade, celle en vert à l'entablement, celle en rouge à la zone à débit planaire et celle en jaune à la pseudo-colonnade.

Pour la coulée de La Palisse, les proportions en An des plagioclases varient de 48 à 55 %, en Ab de 42 à 50 % et en Or de 2 à 4 %. Les gammes de variations sont plus étroites pour les échantillons de la zone à débit planaire (50 < An % < 55, 43 < Ab % < 48, 2 < Or % < 3) que pour les plagioclases de la colonnade, de l'entablement et de la pseudo-colonnade (Figure 3- 15c). Les proportions en Or sont légèrement plus élevées pour les plagioclases de la colonnade et de

l'entablement ( $2 < \text{Or } \% < 4$  et  $3 < \text{Or } \% < 4$  respectivement) que pour ceux de la zone à débit planaire et de la pseudo-colonnade ( $2 < \text{Or } \% < 3$  et  $\text{Or } \% = 2$ , respectivement).

Les compositions chimiques des olivines des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier sont présentées dans le **Tableau 3- 4** et la **Figure 3- 16**. La composition en forstérite (Fo) varie de 66 à 83 pour les échantillons de La Palisse et de 66 à 85 pour ceux de Saint-Arcons-d'Allier. Sur la figure 13, Les proportions en Fo des olivines des laves de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier sont reportées dans un diagramme en fonction de Ca (% atomique), où les analyses des cœurs et des bords des olivines sont distinguées. Les bords des olivines possèdent une gamme de variation en proportion Fo plus importante ( $66 < \text{Fo} < 84$ ) que les cœurs ( $70 < \text{Fo} < 85$ ) (**Tableau 3- 4**). Les diagrammes Fo en fonction de Ca (**Figure 3- 16**) montrent que la majorité des bords des olivines sont contenus dans l'intervalle  $66 < \text{Fo} < 80$ , tandis que les cœurs des olivines sont compris dans l'intervalle  $78 < \text{Fo} < 85$ . Ces diagrammes montrent également que plus Fo est important, plus Ca est faible.

Les **Figure 3- 16a et b** montrent les compositions des olivines en fonction de leur emplacement dans les coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier. Pour la coulée de Saint-Arcons-d'Allier, les olivines des échantillons issus de la base du prisme montrent des gammes de variations en Fo plus larges ( $66 < \text{Fo} < 85$ ) que pour les échantillons du sommet du prisme ( $72 < \text{Fo} < 85$ ). Les cœurs des olivines présentent des gammes de variation de 84 à 85 pour les échantillons du sommet du prisme et de 79 à 85 pour ceux de la base. Les bords des olivines varient de 72 à 84 pour les échantillons du sommet du prisme et de 66 à 78 pour ceux de la base.

Pour la coulée de La Palisse, les olivines issues des échantillons de la zone à débit planaire présentent les proportions en Fo les plus faibles ( $\text{Fo} = 66$  pour les bords) avec une gamme de variation large ( $66 < \text{Fo} < 83$ ). Les olivines issues des échantillons de l'entablement indiquent une gamme de variations plus faibles ( $73 < \text{Fo} < 83$ ). Les zones correspondant aux olivines de la colonnade et de la fausse colonnade se superposent (**Figure 3- 16**), avec des gammes de variations de 72 à 83 pour la colonnade et de 73 à 82 pour la pseudo-colonnade. Les échantillons présentant les cœurs d'olivines les plus riches Fo sont ceux de la colonnade ( $79 < \text{Fo} < 83$ ) et les moins riches ceux de la zone à débit planaire ( $70 < \text{Fo} < 83$ ). Les échantillons présentant les bords des olivines les plus pauvres en Fo sont les échantillons de la zone à débit planaire ( $66 < \text{Fo} < 72$ ) et les plus riches ceux de la pseudo-colonnade ( $73 < \text{Fo} < 82$ ).

Nous pouvons déduire de ces observations que les cœurs des olivines sont en équilibre avec le magma initial alors que les bords reflètent l'évolution du magma au cours de la cristallisation. Le fait que les cœurs des olivines analysées soient plus riches en Fo que les bords montre que la majorité de ces olivines se sont formées avant l'éruption de la lave. La teneur en Ca dans les olivines serait fonction de la pression lors de leur cristallisation (Stormer, 1973). Plus il y a de pression au cours de la cristallisation, plus les olivines sont pauvres en Ca. Le fait que les cœurs des olivines soient plus pauvres en Ca que les bords confirme que ces olivines ont débuté leur cristallisation en profondeur et que les bords se sont rééquilibrés dans un liquide où la pression était plus faible donc plus en

surface. Les gammes de variations en Fo et Ca entre les différents niveaux des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier sont comparables entre elles, et ne permettent pas d'attribuer une composition chimique d'olivine spécifique à chaque niveau des coulées.

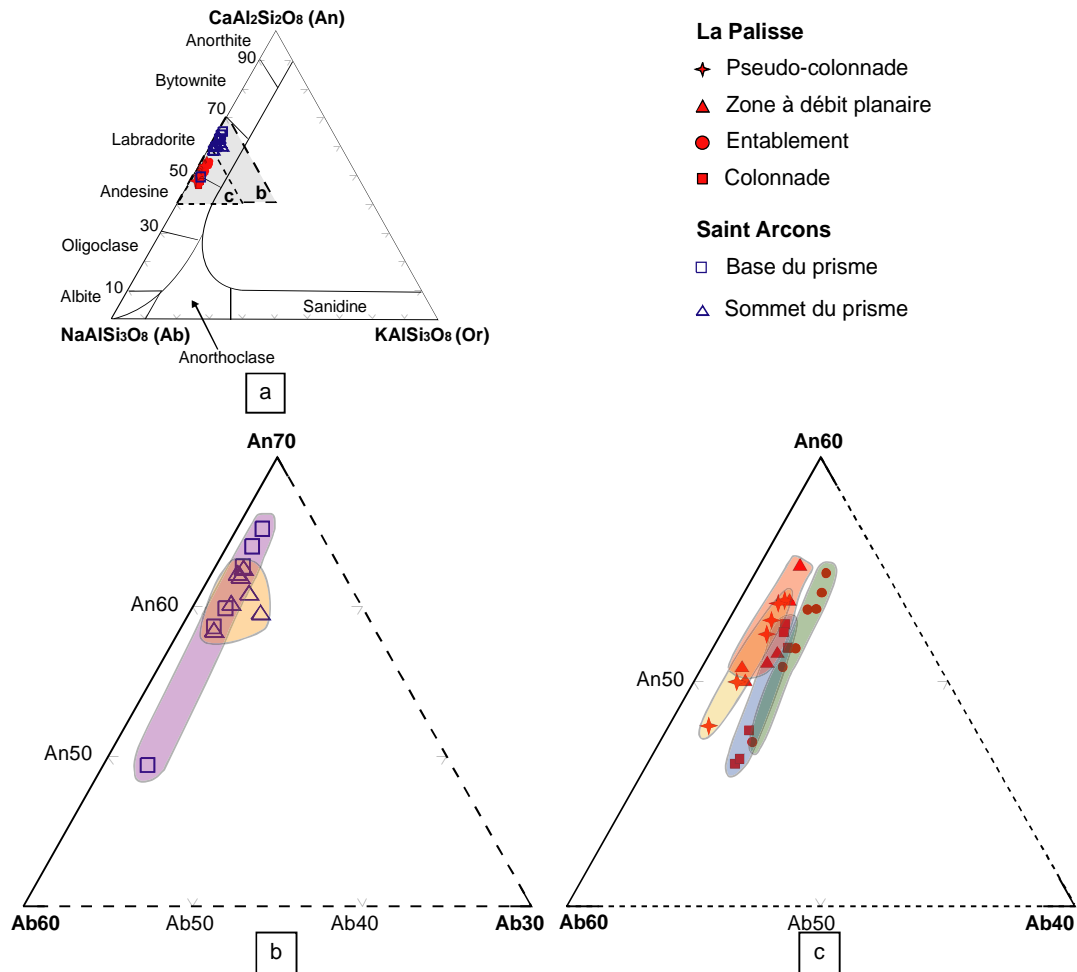


Figure 3- 15 : Compositions chimiques des plagioclases des échantillons issus de la coulée de La Palisse (rouge) et de Saint-Arcons-d'Allier (bleu) obtenues par microsonde électronique. (a) Nomenclature utilisée pour décrire ces données (Smith & Brown, 1988). Les diagrammes ternaires présentés en (b) et (c) sont indiqués en gris. (b) Diagramme ternaire An-Ab-Or des échantillons de Saint-Arcons-d'Allier). La zone représentant les échantillons issus de la base du prisme est en mauve, celle correspondant au sommet du prisme est en orange. (c) Diagramme ternaire An-Ab-Or des échantillons de La Palisse La zone en bleu correspond aux échantillons de la colonnade, celle en vert à l'entablement, celle en rouge à la zone à débit planaire et celle en jaune à la pseudo-colonnade.

	N	Fo cœur	Fo bord
<b>La Palisse</b>			
Pseudo-colonnade	8	77.9 - 82.4	72.6 - 82.1
Zone à débit planaire	10	70.2 - 83.2	66.1 - 72.1
Entablement	8	77.5 - 83.1	73.2 - 78.2
Colonnade	10	78.9 - 82.9	71.5 - 80.5
<b>Saint-Arcons-d'Allier</b>			
Sommet du prisme	9	84.1 - 85.4	71.5 - 83.9
Base du prisme	10	77.8 - 85	66.2 - 78.4

Tableau 3- 4 : Gamme de variation en proportion de forstérite (Fo) des olivines des échantillons issus des différents niveaux des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier.



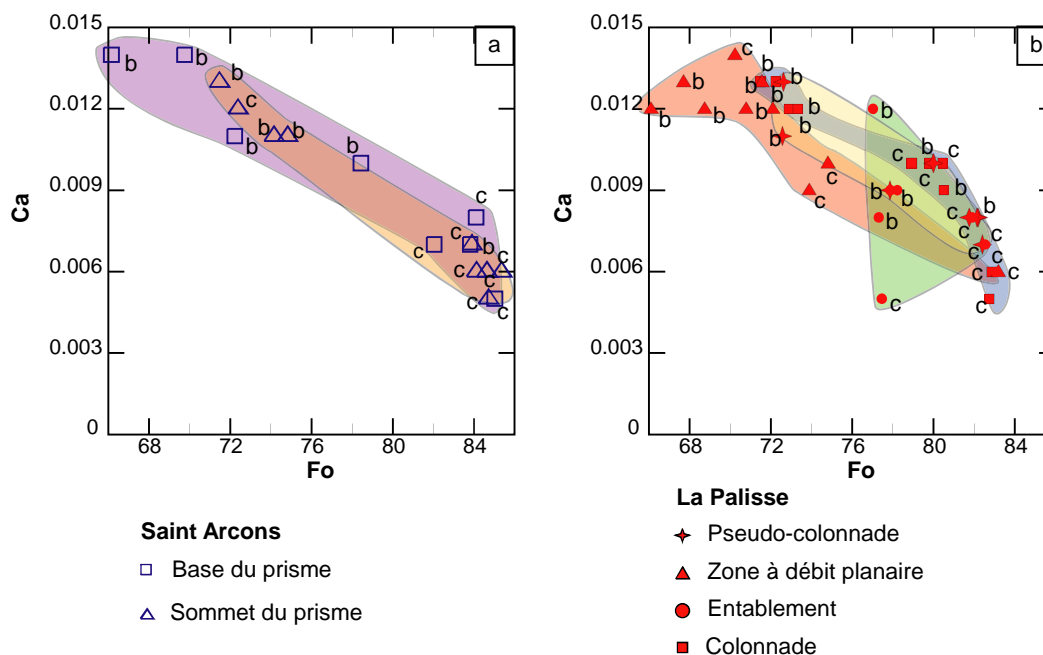


Figure 3- 16 : Diagrammes des compositions des olivines en proportion Fo et nombre de cation sur la base de 4 oxygènes, (a) Diagramme des échantillons de Saint-Arcons-d'Allier, la zone mauve correspondant aux échantillons de la base du prisme et la zone orange à ceux du sommet. (c) Diagramme des échantillons de La Palisse, la zone bleue correspondant aux échantillons de la colonnade, la verte à ceux de l'entablement, la rouge à ceux de la zone à débit planaire et la jaune à la pseudo-colonnade. c et b correspondent aux analyses au cœur et bord des olivines.

Les compositions chimiques des oxydes des échantillons des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier indiquent qu'il s'agit de titanomagnétites ( $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$  avec  $0 \leq x \leq 1$ ) riches en titane appartenant à la solution solide dont les pôles sont l'ulvöspinelle  $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$  ( $x = 1$ ) et la magnétite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ( $x = 0$ ), avec  $x$  correspondant à la proportion d'ulvöspinelle (*Tableau 3- 5, Figure 3- 17a*). Le calcul de la formule structurale des titanomagnétites est précisée en *annexe III*, avec l'hypothèse que le fer total se distribue de la façon suivante :  $\text{Fe}_{\text{tot}} = 1/3 \text{Fe}^{2+} + 2/3 \text{Fe}^{3+}$ .

Pour la coulée de Saint-Arcons-d'Allier, le diagramme ternaire des proportions molaires  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{TiO}_2$  (*Figure 3- 17b*) ne montre pas de variation particulière entre les titanomagnétites de la base et du sommet du prisme. Les proportions d'ulvöspinelle varient de 0,55 à 0,62 avec des gammes de variation comparables entre les échantillons issus de la base du prisme ( $0,55 < x_{\text{ulvosp}} < 0,62$ ) et ceux du sommet ( $0,55 < x_{\text{ulvosp}} < 0,60$ ).

Pour la coulée de La Palisse, le diagramme ternaire  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{TiO}_2$  (*Figure 3- 17c*) montre des gammes de variations plus étroites pour les titanomagnétites issus de l'entablement et de la zone à débit planaire et plus larges pour celles de la colonnade et de la pseudo-colonnade. Les proportions d'ulvöspinelle varient de 0,32 à 0,79, ce qui correspond à la gamme de variation des titanomagnétites des échantillons de la pseudo-colonnade (*Tableau 3- 5*). Les gammes de variation les plus étroites correspondent aux échantillons de l'entablement ( $0,63 < x_{\text{ulvosp}} < 0,65$ ) et de la zone à débit planaire ( $0,55 < x_{\text{ulvosp}} < 0,60$ ). Malgré un nombre de grains analysés plus important pour la colonnade, la gamme de variation est plus faible que celle de la pseudo-colonnade, de 0,38 à 0,64.

	Titanomagnétites				
	N	X <sub>Ulvosp</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
<b>La Palisse</b>					
Pseudo-colonnade	9	0,32 - 0,79	58,47 - 74,63	7,29-23,43	17,85 - 34,41
Zone à débit planaire	9	0,55 - 0,60	60,62 - 67,22	14,07 - 15,90	24,97 - 27,78
Entablement	6	0,63 - 0,65	51,71 - 55,52	16,44 - 19,14	18,58 - 21,08
Colonnade	13	0,38 - 0,64	51,49 - 71,29	9,38 - 18,89	18,34 - 32,58
<b>Saint-Arcons-d'Allier</b>					
Sommet du prisme	6	0,55 - 0,60	60,56 - 64,37	15,11 - 16,13	24,53 - 26,23
Base du prisme	6	0,55 - 0,62	61,12 - 65,53	14,91 - 16,28	24,73 - 26,78

Tableau 3- 5 : Composition des titanomagnétites des différents niveaux des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier. X<sub>Ulvosp</sub> est la proportion d'ulvöspinelle dans le système magnétite-ulvöspinelle, FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et TiO<sub>2</sub> sont exprimés en pourcentage molaire.

*En résumé*, pour la coulée de Saint-Arcons-d'Allier, la composition des titanomagnétites n'est pas corrélée à la position de l'échantillon le long d'un prisme issu de la colonnade. Pour la coulée de La Palisse, les compositions des titanomagnétites semblent varier en fonction de l'emplacement des échantillons dans la coulée avec des gammes de variation importantes pour les échantillons de la pseudo-colonnade et légèrement plus faibles pour ceux de la colonnade. Les échantillons de l'entablement et de la zone à débit planaire présentent des gammes de variation plus étroites qui ne se recoupent pas entre elles. Les proportions d'ulvöspinelle sont semblables pour les titanomagnétites de la colonnade, la zone à débit planaire et la pseudo-colonnade, avec des valeurs autour de 0,56. Les titanomagnétites de l'entablement montrent une moyenne plus élevée de 0,64. Cependant, le nombre de grains analysés étant moindre que pour les autres niveaux, nous ne pouvons pas interpréter ces variations de manière fiable.

## 2.1. Étude isotopique des laves à l'échelle de la coulée

Des analyses des isotopes de l'hydrogène ont été réalisées sur les poudres de roches totales. Les rapports isotopiques de l'hydrogène ont été déterminés après extraction de la fraction gazeuse dans une ligne sous vide de type conventionnelle au laboratoire d'Isotopes Stables de l'Université Jean Monnet (LMV-TL). Après dégazage de la poudre de roche totale sous vide à 150°C pendant 2h pour éliminer l'eau atmosphérique adsorbée en surface, l'eau de constitution des échantillons est libérée par fusion de la poudre en utilisant une torche butane-oxygène à une température de 1300 °C. Les gaz libérés passent dans un four CuO à 575 °C pour transformer l'hydrogène en H<sub>2</sub>O. H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub> sont piégés à l'azote liquide (env. -185°C) et les gaz non-condensables sont pompés. Le CO<sub>2</sub> est ensuite éliminé en changeant le piège d'azote liquide par un piège à plus haute température (environ -90°C, mélange éthanol + azote liquide). H<sub>2</sub>O est converti en H<sub>2</sub> dans un four à uranium chauffé à 800°C (Biegelsen et al., 1952) et H<sub>2</sub> est piégé par adsorption physique à froid sur du charbon actif plongé dans l'azote liquide. H<sub>2</sub> d'un standard interne GCK (Georgia Clay Kaolinite) est extrait dans les mêmes conditions que les échantillons. Le rapport isotopique recommandé de ce standard est :  $\delta D = -59 \pm 3 \text{ ‰}$  V-SMOW. Les rapports isotopiques de l'hydrogène sont mesurés avec un spectromètre de masse à source gazeuse de type Micromass IsoPrism, au laboratoire

d'Isotopes Stables de l'Université Jean Monnet (LMV-TL). Les résultats sont exprimés par rapport au standard international V-SMOW (Vienna Standard Mean Oceanic Water) selon la notation classique des  $\delta$  où  $\delta D = (R_{\text{échantillon}} / R_{\text{standard}} - 1) \times 10^3$  et  $R = D/H$ . La précision analytique sur les échantillons de roches totales est de l'ordre de 5 ‰.

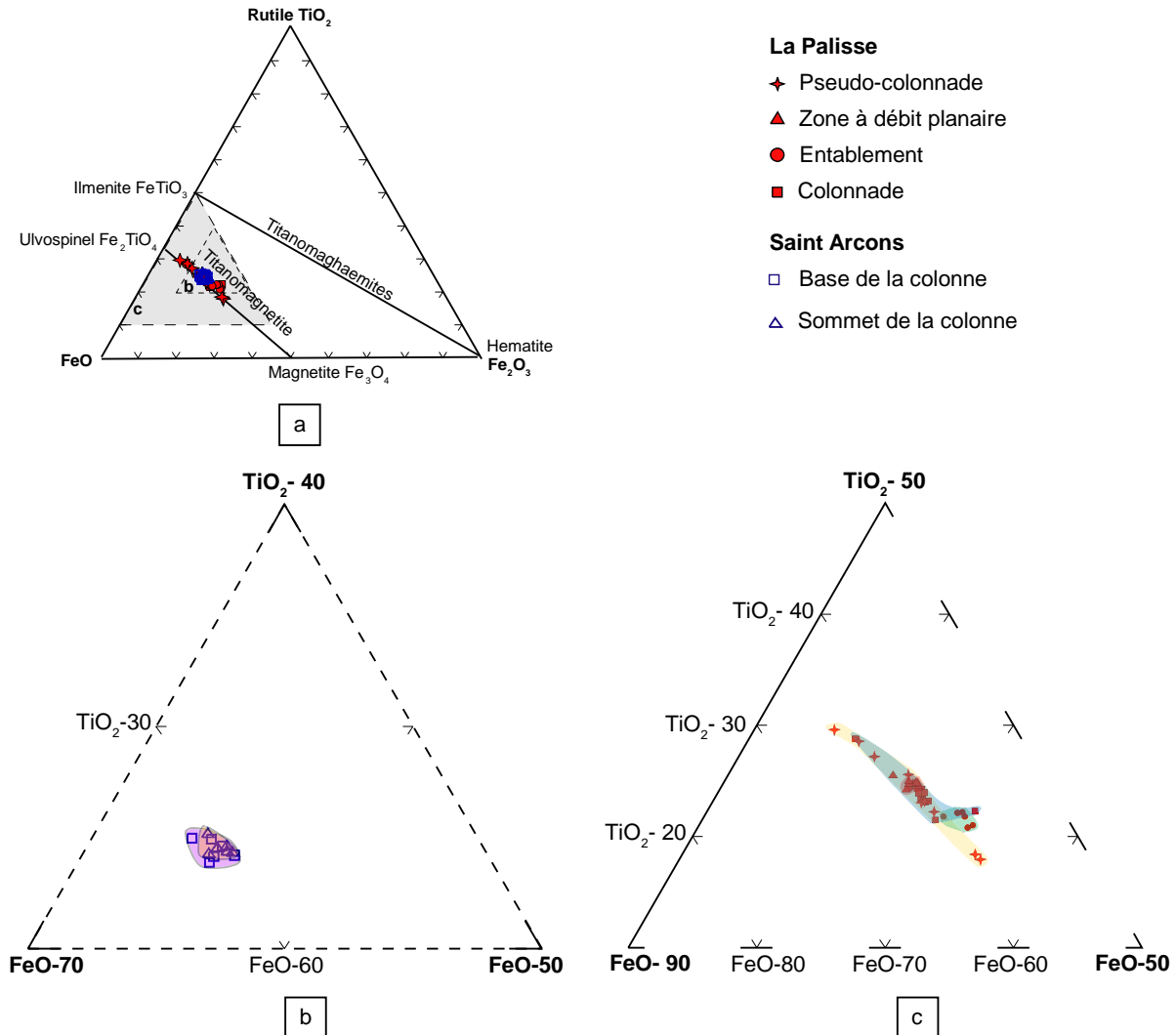


Figure 3- 17 : Diagrammes ternaires  $TiO_2$ - $FeO$ - $Fe_2O_3$ . (a) Classification des oxydes Fe-Ti montrant les solutions solides magnétite-ulvöspinnelle, hématite – ilménite (Clark, 1997). Les diagrammes ternaires présentés en (b) et (c) sont indiqués en grisé. (b) Diagramme ternaire des oxydes des échantillons de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier. La zone représentant les échantillons issus de la base du prisme est en mauve, celle correspondant au sommet du prisme est en orange. (c) Diagramme ternaire correspondant aux échantillons des différents niveaux de la coulée de La Palisse. La zone en bleu correspond aux échantillons de la colonnade, celle en vert à l'entablement, celle en rouge à la zone à débit planaire et celle en jaune à la pseudo-colonnade.

Des analyses des isotopes de l'oxygène ont été réalisées sur les poudres de roches totales. Les rapports isotopiques de l'oxygène ont été déterminés après dégazage sous vide à 250°C pendant 2 heures dans une ligne d'extraction de type conventionnelle au laboratoire d'Isotopes Stables de l'Université Jean Monnet (LMV-TL). Les échantillons sont attaqués à 550°C pendant 12 heures avec du  $BrF_5$  pour libérer l'oxygène, qui est ensuite converti en  $CO_2$  en utilisant un barreau de graphite platinisé chauffé à 600°C (Clayton & Mayeda 1963). Deux duplicata d'un standard interne MQ

(quartz de Murchinson Line, fourni par l'Université de Cape Town, Afrique du Sud) sont systématiquement ajoutés à chaque série de 5 échantillons dont 1 est également dupliqué. Les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  des standards MQ ont été précisément déterminées à  $10.1 \pm 0.2 \text{ ‰ VSMOW}$  (Vennemann & Smith 1990) par calibration avec le standard international NBS-28 (9,64 ‰ SMOW, Coplen 1988). Les rapports isotopiques de l'oxygène sont mesurés avec un spectromètre de masse à source gazeuse de type Micromass IsoPrism, au laboratoire d'Isotopes Stables de l'Université Jean Monnet (LMV-TL). Les données sont reportées selon la notation classique des  $\delta$  où  $\delta^{18}\text{O} = (R_{\text{échantillon}} / R_{\text{standard}} - 1) \times 10^3$  et  $R = {}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$ . La valeur moyenne des 10 duplicata de MQ analysés au cours de cette étude était de 10.1‰ et la moyenne des écarts entre ces duplicata de l'ordre de 0.17‰. En conséquence, une précision analytique de l'ordre de 0,3‰ (2 $\sigma$ ) semble raisonnable pour l'ensemble des échantillons.

Les pourcentages d'eau calculés à partir des rendements de la réaction d'extraction de l'hydrogène sont reportés dans le **Tableau 3- 6** pour les échantillons issus des différents niveaux de la coulée de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier. Dans l'ensemble, la teneur en eau des échantillons reste faible, inférieure à 0,6%, indicatrice d'une relative fraîcheur des échantillons et donc d'une faible influence des processus secondaires d'altération météorique, ce qui était déjà apparu lors de l'étude pétrographique.

	Zones	Echantillons	% eau dans l'échantillon	dD (‰VSMOW)	d18O (‰VSMOW)	Moyenne	Ecart type
Saint-Arcons-d'Allier	Sommet prisme	STA-1-2A	0.42	-76.0	6.56		
	Base prisme	STA-4-1BOT(1)	0.45	-115.0	6.34		
		STA-4-1BOT(1)	0.39	-104.5			
		STA-4-1BOT(2)	0.47				
		STA-4-1BOT(2)	0.35	-104.1			
La Palisse	Pseudo-colonnade	08TB50BOT	0.18	-106.6	6.34	6.17	0.16
		08TB50BOT	0.23	-98.0			
		08TB50B	0.53	-73.0	6.32		
	Zone à débit planaire	08TB60BOT	0.21	-89.0	6.28		
					6.06		
	Entablement	08TB37BOT	0.39	-79.0	6.03		
		08TB35	0.50	-82.8	6.43		
	Colonnade	08TB14B	0.22	-99.0	6.57		
		08TB14B	0.16	-108.4			

Tableau 3- 6 : Rapports isotopiques de l'hydrogène et de l'oxygène pour les échantillons issus des différents niveaux de la coulée de La Palisse et pour les échantillons issus de la colonne de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier. Les % d'eau dans l'échantillon ainsi que le rendement théorique pour chaque échantillon utilisé sont également reportés. Les échantillons notés B sont situés au bord de la carotte (donc au bord du prisme) et les échantillons notés Bot au fond de la carotte (donc à l'intérieur du prisme).

Pour la coulée de La Palisse, le pourcentage d'eau moyen le plus élevé est de 0,45 pour les échantillons issus de l'entablement et le plus faible est de 0,19 pour les échantillons de la colonnade. Les échantillons issus de la zone à débit planaire présentent un pourcentage de 0,21. L'échantillon 08tb50Bot (pseudo-colonnade) indique le même pourcentage d'eau alors que l'échantillon 08tb50B

possède plus d'eau (0,53). Les pourcentages d'eau sont reportés dans des diagrammes en fonction du  $\delta D$  et du  $\delta^{18}O$  (Figure 3- 18a et b). Les pourcentages d'eau montrent une corrélation positive avec les  $\delta D$  (Figure 3- 18a). Cette corrélation ne semble pas être fonction de l'emplacement de l'échantillon dans la coulée. Le  $\delta^{18}O$  ne semble pas être corrélé au pourcentage d'eau (Figure 3- 18b).

Pour la coulée de Saint-Arcons-d'Allier, le pourcentage d'eau dans l'échantillon issu du sommet du prisme (STA-1-2A) présente un pourcentage d'eau de 0,42, similaire à la moyenne des pourcentages des échantillons issus de la base de la colonne (STA-4-1Bot). Le pourcentage d'eau ne semble pas être corrélé au  $\delta D$  (Figure 3- 18a). L'échantillon de la base du prisme présente un  $\delta^{18}O$  plus faible ( $\delta^{18}O = 6,3 \text{ ‰}$ ) que pour l'échantillon du sommet du prisme ( $\delta^{18}O = 6,6 \text{ ‰}$ ) pour un pourcentage d'eau comparable (Figure 3- 18b). Ces deux valeurs ne nous permettent pas de conclure sur une corrélation entre le pourcentage d'eau et le  $\delta^{18}O$ .

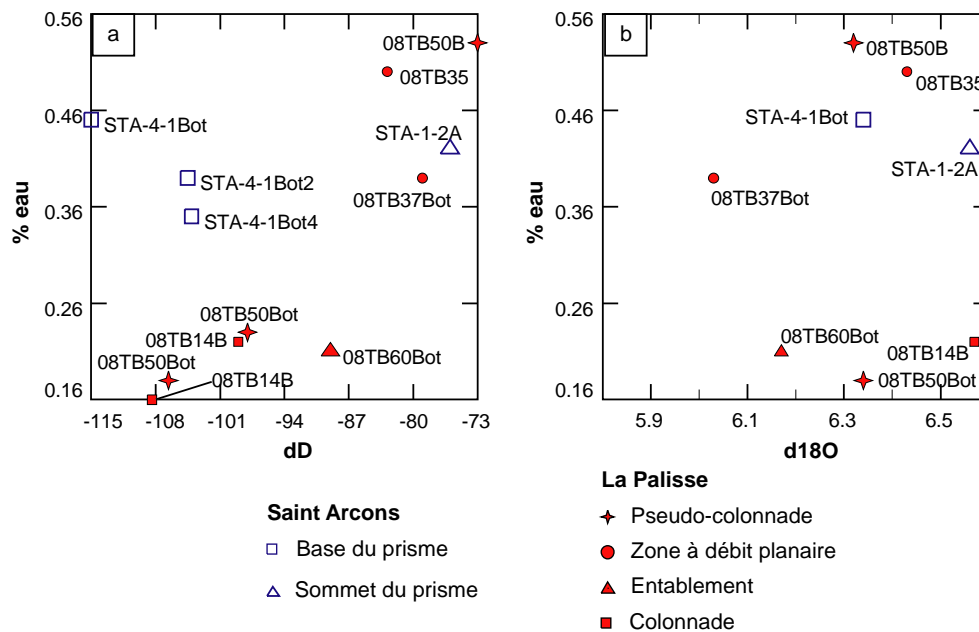


Figure 3- 18 : Données issues de l'extraction de l'hydrogène et de l'oxygène des échantillons des différents niveaux de la coulée de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier. (a) Pourcentage d'eau dans l'échantillon en fonction de  $\delta D$ , (b) pourcentage d'eau dans l'échantillon en fonction de  $\delta^{18}O$ .

Pour les coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier, le pourcentage d'eau est toujours inférieur à 1 %. Ce qui nous permet de dire que l'effet de l'altération sur les échantillons étudiés reste très faible (Hoefs, 2009). Cependant, une corrélation nette apparaît entre le pourcentage d'eau et le  $\delta D$  pour les échantillons de la coulée de La Palisse. Plusieurs phénomènes peuvent à l'origine des variations de ces paramètres comme le processus de dégazage, l'eau additionnelle à température magmatique ou l'altération à basse température (Kyser et O'Neil, 1984, Taylor et al., 1984 et Harmon et Hoefs 1995). Kyser et O'Neil (1984) précisent que la valeur initiale du  $\delta D$  pour les basaltes se situe autour de -80 ‰, avec une gamme de variation de  $-78 < \delta D \text{ ‰} < -85$  et de  $4,3 < \delta^{18}O \text{ ‰} < 11,4$  pour les basaltes continentaux (Harmon et Hoefs, 1995). Kyser et O'Neil, 1984 décrivent des corrélations entre le pourcentage d'eau et le  $\delta D$  et indiquent que dans le cas de l'altération des roches à basse température, le pourcentage d'eau augmente avec le  $\delta D$ . Dans le cas d'un phénomène de dégazage, c'est le pourcentage d'eau qui diminue avec le  $\delta D$ . Suivant ces hypothèses, l'échantillon 08tb37Bot montre un  $\delta D$  a priori initial et un pourcentage d'eau

intermédiaire de 0,4. Les échantillons dont le pourcentage d'eau est inférieur à 0,4 montrent des  $\delta D$  qui diminuent avec le pourcentage, ce qui est décrit comme étant les conséquences d'un phénomène de dégazage par Kyser et O'Neil (1984). Les échantillons dont le pourcentage d'eau est supérieur à 0,4 présentent des  $\delta D$  qui augmentent avec le pourcentage d'eau, et qui correspondraient aux effets de l'altération. Cependant, les pourcentages d'eau étant inférieurs à 1 %, nous ne pouvons affirmer de manière certaine l'effet de l'altération dans ces échantillons. De plus, la faible variation du pourcentage d'eau (de l'ordre de 0,4 %) ne nous permet pas non plus de conclure sur un réel effet du dégazage.

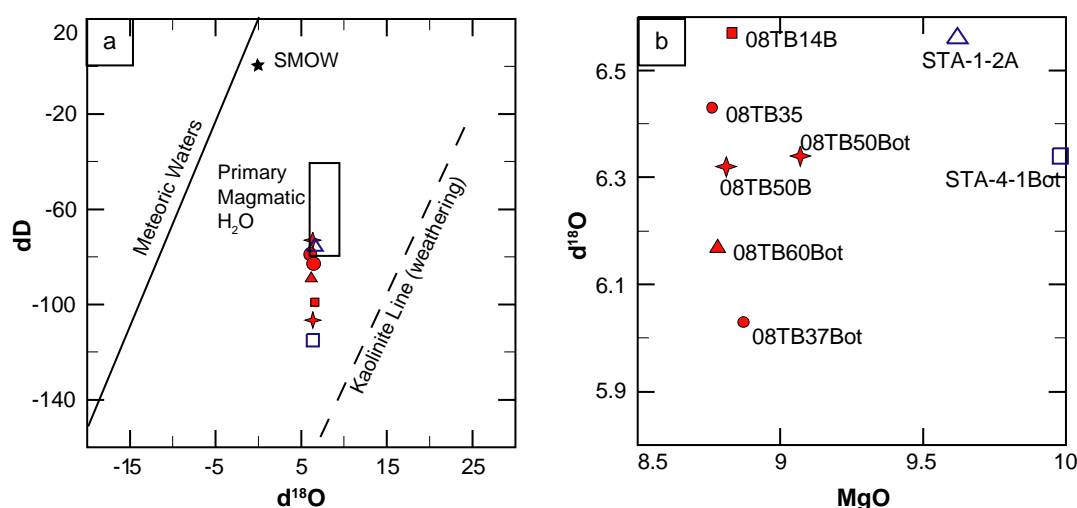


Figure 3- 19 : Données isotopiques de l'hydrogène et de l'oxygène des différents niveaux des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier. (a)  $\delta D$  en fonction de  $\delta^{18}O$  avec les valeurs correspondantes aux eaux magmatiques primaires (Sheppard et al., 1969), eaux météoriques, SMOW et à la ligne des kaolinites (Savin and Epstein, 1970).

Les données isotopiques des échantillons de la coulée de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier sont reportées dans un diagramme  $\delta D$  en fonction de  $\delta^{18}O$  (Figure 3- 19a). Les données isotopiques des échantillons étudiés sont bien dans la gamme de variation des eaux magmatiques primaires (Sheppard et al, 1969) pour le  $\delta^{18}O$  ( $5,5 < \delta^{18}O \text{ ‰} < 9,5$ ), mais présentent des valeurs plus faibles en  $\delta D$ . Nous constatons qu'il n'y a pas de décalage vers la ligne des eaux météoriques qui montrerait de l'hydrothermalisme ou un décalage vers la ligne des kaolinites qui indiquerait l'effet de l'altération.

Les  $\delta^{18}O$  des échantillons de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier ont été reportés dans un diagramme en fonction du MgO (Figure 3- 19b). Pour la coulée de La Palisse, nous observons qu'il n'y a pas de corrélation entre le MgO et le  $\delta^{18}O$ . Pour la coulée de Saint-Arcons-d'Allier, deux points d'analyse ne sont pas suffisant pour établir une corrélation. Nous observons simplement que l'échantillon au sommet du prisme qui présente la teneur en MgO la plus faible, présente le  $\delta^{18}O$  le plus élevé. Cependant, nous pouvons constater que les échantillons de Saint-Arcons-d'Allier, qui sont moins différenciés que ceux de La Palisse, présentent des  $\delta^{18}O$  plus importants que pour La Palisse. Nous pouvons conclure que ces différences de  $\delta^{18}O$  entre deux coulées dont la composition géochimique est semblable, ne sont pas dues à de l'altération à haute ou basse température mais correspondraient plus vraisemblablement à une signature isotopique magmatique différente liée aux processus de genèse des deux magmas (provinces volcaniques et âges du volcanisme différents).

*En conclusion*, les données isotopiques sur les coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier ne nous ont pas apporté d'éléments clairs permettant de caractériser les différents niveaux de chaque coulée. Les quantités d'eau, mesurées par extraction de l'hydrogène, permettent d'affirmer que l'altération n'intervient pas ou très peu, ce qui est en accord avec les observations pétrographiques détaillées en amont. Les variations du pourcentage d'eau et du  $\delta D$  nous montrent qu'un dégazage d'eau notamment dans les échantillons de La Palisse a pu se produire. Or les quantités d'eau étant très faibles, il est difficile de conclure sur une réelle perte d'eau.

## Conclusion :

Les études pétrographiques des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier ne montrent pas de variations de la composition modale ni de la texture entre les différents niveaux. Les études géochimiques sur roches totales ne permettent pas de mettre en évidence des compositions des éléments majeurs, traces et REE spécifiques à chaque niveau de la coulée de La Palisse. Par contre, pour la coulée de Saint-Arcons-d'Allier, nous observons un léger effet de différenciation entre la base du prisme issu de la colonnade et le sommet. Les compositions en éléments majeurs des olivines, clinopyroxènes, plagioclases et titanomagnétites sont semblables dans les différents niveaux des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier. Cet effet de différenciation entre la base et le sommet du prisme de Saint-Arcons-d'Allier n'est donc pas dû à une évolution de la composition des minéraux. Ce n'est pas non plus une variation de la proportion des minéraux qui produit cet effet de différenciation comme une accumulation de cristaux notamment d'olivine à la base du prisme, étant donné qu'il n'y a pas d'évolution de la composition modale entre la base et le sommet du prisme. Seule une évolution de la composition chimique de la partie vitreuse au cours de la cristallisation pourrait expliquer cet effet de différenciation. Au cours de la cristallisation, un processus de diffusion d'éléments se produirait dans la partie vitreuse entre la base et le sommet du prisme, avec les éléments compatibles plus concentrés à la base du prisme vers une concentration des éléments les plus incompatibles au sommet du prisme.

Les données isotopiques de l'hydrogène et de l'oxygène ne permettent pas non plus de différencier les niveaux de chaque coulée. Cependant la quantité d'eau mesurée dans tous les échantillons nous permet de conclure qu'il n'y a pas d'altération dans les roches étudiées.

Ces études à l'échelle de la coulée pour La Palisse ou à l'échelle d'un niveau de la coulée comme la colonnade de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier montrent certaines variations pour la coulée de Saint-Arcons-d'Allier qui ne se retrouvent pas dans la coulée de La Palisse. Les études structurales présentées dans les chapitres 4 et 5 confirment également des caractéristiques différentes entre les deux coulées.





## Chapitre 4. Études magnétiques et cristallographiques de la coulée de La Palisse

## Introduction :

Les études structurales à partir d'analyses magnétiques et cristallographiques à l'échelle de la coulée de La Palisse sont présentées dans ce chapitre sous forme de publication. Le but de cette étude est de mieux comprendre la signature d'ASM dans les coulées basaltiques afin de mieux utiliser cet outil pour révéler les structures en l'absence de marqueurs macroscopiques de l'écoulement. Cette technique, rapide et précise est jugée efficace dans de nombreuses études effectuées sur d'autres types de roches comme les granites ou les dykes (par exemple, Borradaile et Henry, 1997 ; Bouchez et al., 2000.). Dans les coulées de laves basaltiques où l'anisotropie est faible, l'ASM reste encore difficile à interpréter et ce qui explique que cette technique reste peu utilisée dans les laves. Nous avons donc réalisé une étude méthodologique intégrant une étude détaillée de la minéralogie magnétique et des mesures des orientations cristallographiques des minéraux afin de mieux comprendre ce qui porte et ce qui contrôle l'ASM dans les laves.

La coulée de La Palisse présente un certain nombre d'avantages pour une étude structurale : il s'agit d'une coulée récente (environ 75 ka), dont le centre d'émission et le sens d'écoulement sont connus. Elle présente également les différents niveaux que l'on observe dans des coulées prismées : la colonnade, l'entablement et la pseudo-colonnade, avec un niveau peu décrit dans la littérature nommé ici zone à débit planaire. Sur cette coulée, nous avons sélectionné deux sites d'échantillonnage complémentaires qui permettent d'étudier tous les niveaux de la base vers le sommet de la coulée.

L'interprétation des mesures d'ASM est basée sur celle menée dans les dykes par Knight et Walker (1988) et Geoffroy et al. (2002) qui se basent sur l'existence d'une obliquité entre foliations magnétiques et épontes des filons (angle d'imbrication). Cette hypothèse d'une imbrication entre la foliation magnétique, la paléosurface à la base et la surface scoriacée au sommet semble justifiée puisque nous retrouvons dans tous les niveaux de la coulée une direction de l'écoulement en accord avec celle déduit du terrain. Cependant, le sens de l'écoulement est opposé entre les deux sites d'échantillonnage, mettant en évidence une permutation entre les axes  $k_1$  et  $k_3$ . Les orientations préférentielles de réseau (OPR) montrent des fabriques très marquées pour les plagioclases et notamment pour le plan (010), parallèle au plan d'écoulement. De plus, des relations peuvent être établies entre les OPR des plagioclases et des clinopyroxènes : les plans (100) du plagioclase et (001) du clinopyroxène tendent à être parallèle, et les plans (010) du plagioclase et (100) du clinopyroxène tendent également à être parallèle. La titanomagnétite présente sous forme de grains subautomorphes ne montre pas d'orientation préférentielle de réseau marquée. La comparaison entre les fabriques magnétiques et cristallographiques indique que l'anisotropie des laves correspond à une anisotropie de distribution des grains de titanomagnétite qui est contrôlée par l'orientation de la trame silicatée (plagioclase et clinopyroxènes).

La correspondance entre la direction d'écoulement déduite de l'ASM et celle déduite du terrain, ainsi que la cohérence entre les fabriques magnétiques et cristallographiques montrent l'intérêt d'utiliser l'ASM dans les coulées de lave. Toutefois, la fiabilité de la technique ASM pour la détermination du sens d'écoulement reste à démontrer. La présence de fabriques inverses observées dans le deuxième site d'échantillonnage indiquant un sens d'écoulement opposé, ne peut être expliquée par la présence de grains magnétiques monodomaines car ces derniers n'ont pu être mis

en évidence ni pas les mesures d'hystérésis, ni par les mesures d'anisotropie de rémanence magnétique (ARM).

La seule différence notable entre le site 1 et le site 2 est l'inclinaison de la paléosurface, subhorizontale dans le premier et de 50° dans le second. L'origine des fabriques inverses dans le second site pourrait être reliée à l'inclinaison de la paléosurface. Il serait intéressant d'appliquer l'approche méthodologique que nous avons menée sur des coulées ayant différentes inclinaisons de paléosurface. De plus, la mise en place de modèles analogiques permettra de mieux comprendre les relations entre la minéralogie magnétique et la trame silicatée en fonction de paramètres rhéologiques, de cisaillement et d'inclinaison et de déterminer l'origine des fabriques « anormales » dans les coulées.

L'ASM apparaît donc comme un bon outil pour retrouver les directions d'écoulement. Cependant, un contrôle par des mesures ponctuelles complémentaires des fabriques cristallographiques (OPR, OPF) est nécessaire pour interpréter au mieux le signal de l'ASM.

# Internal structure of basalt flows: insights from magnetic and crystallographic fabrics of the *La Palisse* volcanics, French Massif Central

T. BOIRON<sup>1,2</sup>, J. BASCOU<sup>2</sup>, P. CAMPS<sup>3</sup>, E. C. FERRÉ<sup>4</sup>,  
C. MAURICE<sup>1</sup>, B. GUY<sup>1,2</sup>, M.-C. GERBE<sup>2</sup>, P. LAUNEAU<sup>5</sup>

**Manuscript for submission to *Geophysical Journal International*, 20/12/2011.**

<sup>1</sup>Ecole nationale supérieure des mines de Saint Etienne, 158 cours Fauriel, 42023 Saint Etienne, France

<sup>2</sup>Université de Lyon, UMR 6524 « Magmas et Volcans », CNRS and Université Jean Monnet, 23, rue du Dr. Michelon, 42023, Saint Etienne, Cedex 02, France (E-mail : jerome.bascou@univ-st-etienne.fr).

<sup>3</sup>Géosciences Montpellier, UMR 5246, CNRS and Université de Montpellier, 34095 Montpellier, France

<sup>4</sup>Department of Geology, Southern Illinois University, Carbondale, IL 62901-4324, USA.

<sup>5</sup>Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes, UMR 6112, CNRS/Université de Nantes, 2 rue de la Houssinière, 44322 Nantes, France

**Keywords:** basalt, columnar jointing, lava flow, magnetic anisotropy, inverse fabric, crystallographic preferred orientation, EBSD

## **Abstract:**

We present a new interpretation of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) fabrics in basaltic lava flows, based on the detailed study of magnetic mineralogy and silicate crystallographic fabric of a Quaternary lava flow from the French Massif Central (La Palisse). We consider the model of AMS fabric imbrication between magnetic foliation and flow surface, as initially proposed for dikes. At the two sampling sites, the concordance between the flow direction deduced from the AMS foliation and that deduced from field observations indicates that the imbrication model could apply to the lava flow. However, the flow senses inferred from AMS are systematically opposed between the two sampling sites. This results from a permutation between  $K_1$  and  $K_3$  AMS axes, a configuration referred to as inverse fabric. Electron backscatter diffraction (EBSD) measurements indicate that the lattice-preferred orientation (LPO) of plagioclase exhibits is strong, especially for the (010)-plagioclase axis which tends to be parallel to the flow plane. Clinopyroxene LPO is less strong than plagioclase LPO, whereas titanomagnetite does not display a significant LPO. The comparison between magnetic and crystallographic fabrics indicates that the AMS fabric of the lava flow results from the distribution of titanomagnetite grains, which is in turn controlled by the fabric of the silicate framework. Magnetic hysteresis parameters and anisotropy of magnetic remanence (AMR) measurements exclude a significant contribution from single-domain grains, often called upon to explain inverse magnetic fabrics. The origin of the observed inverse magnetic fabric may relate

to the dip of the paleosurface, which is the only remarkable difference between the two sampling sites. AMS appears as a good tool to determine the direction of basaltic lava flows, provided punctual controls of the crystallographic fabric are performed to better constrain the origin of the AMS fabric.

## **1. Introduction:**

The internal structure of basaltic lava flows may provide key information on flow mechanisms and on lava rheology (e.g., Ventura et al., 1996; Smith, 2002). In general, macroscopic markers such as vesicles (e.g., Aubele et al., 1988) and measurement of lattice-preferred orientation (LPO) allow to investigate the internal structure of a flow (e.g., Long and Wood, 1986; Smith, 2002). However, the scarcity of markers in these rocks which are weakly anisotropic and the time-intensive nature of LPO measurements are significant hindrances to systematic studies of a flow from bottom to top.

The main goal of this study is to investigate if the anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) technique can provide reliable information on internal structures and flow direction. The AMS technique has already been successfully used elsewhere to track both magmatic and deformation fabrics on a wide variety of rocks (e.g., Tarling and Hrouda, 1993; Borradaile and Henri, 1997; Launeau and Cruden, 1998; Bouchez et al., 2000; Ferré et al., 2003; Borradaile and Jackson, 2004), including volcanic rocks (e.g., Knight and Walker, 1988; Cañón -Tapia et al., 2004; Plenier et al., 2005; Looock et al., 2008; Petronis and Geissman, 2008). The significance of magnetic fabrics in volcanic rocks has been questioned because these rocks tend to show a weak magnetic anisotropy, near the detection limit of the AMS technique (Tarling and Hrouda, 1993).

Despite the weak anisotropy of the volcanic rocks, AMS measurements show relationships between magnetic fabric and flow: maximum susceptibility axis  $k_1$  tend to be parallel to the flow direction and minimum susceptibility axis  $k_3$  tend to be perpendicular to the flow plane (Canon-Tapia et al., 1996; Canon-Tapia et al., 1997; Herrero-Bervera et al.; 2001, Zhu et al., 2003; Canon-Tapia et al.; 2004, Raposo and Berquo, 2008). However complications have arisen regarding the significance of AMS fabrics and their relationship to magma flow directions (e.g., Rochette et al., 1999; Henry et al. 2003; Plenier et al. 2005).

In dike the imbrication model proposed by Knight and Walker (1988) considers that  $k_1$  and  $k_3$  should be oblique and symmetrical with respect to the flow direction and flow plane. In this case,

the obliquity further indicates the flow sense. This model often uses  $k_1$ -angle to determine the flow direction (Staudigel et al. 1992; Herrero-Bervera et al., 2001). When the magnitudes of  $k_1$  and  $k_2$  axes are too close (oblate magnetic fabrics), a switch occurs between these two axes. The flow direction can be determined using the distribution of  $K_3$  axes (Callot et al., 2001; Geoffroy et al., 2002). Callot and Guichet (2003) also proposed an analytical model in dykes and concluded that the determination of the flow direction with the maximum susceptibility axis is a misuse, and recommend generalizing the magnetic foliation use.

Complications could also occur when single-domain (SD) magnetite grains are significant contributors to AMS (Potter and Stephenson, 1988). Indeed, in contrast to MD grains,  $k_1$  is parallel to the short axis and  $k_3$  is parallel to the long axis of SD grains. This generates an “inverse” magnetic fabric (Rochette et al., 1999; Ferré, 2002). Other difficulties to interpret the AMS signature could also appear due to magnetic interactions when the ferromagnetic grains are at close distance from each other (Grégoire, et al.; 1995), the effects of multiple mineral-preferred orientations (Hrouda, 1992), viscous strain variations in magma (Dragoni et al., 1997), post-flow alteration (Park et al., 1988) or thermal contraction (Gil-Imaz et al., 2006).

In basaltic lava flows, AMS is also used to infer the flow direction (Canon-Tapia et al., 1996, 1997; Bascou et al., 2005, Looock et al., 2008). The imbrication model is used to determine the flow direction with either  $k_1$  or  $k_3$ . In lava flows, inverse fabrics are also observed (Rochette et al., 1999). Other parameters as chemical composition related to viscosity or paleosurface topography could influence the AMS fabrics (Canon-Tapia et al., 1995; Merle 1998; Henry et al., 2003). In addition, the identification of relationships between AMS and the flow direction may depend on height in the flow. In their AMS study from basaltic lava flow, Bascou et al. (2005) observe a stronger correlation between AMS and flow-related plagioclase preferred orientation in the lower part of the lava flow than at other levels. Thus, the relationships between AMS and flow direction in a flow that could present differences in magnetic mineralogy, crystallographic and magnetic fabrics is still unclear.

In this study, AMS measurements were carried out on a Quaternary lava flow from the French Massif Central (La Palisse basaltic flow), which is exposed at different levels. A detailed study of the magnetic mineralogy has been carried out and relationships between AMS and the flow related silicate framework were investigated through 3D crystallographic fabrics characterization of main minerals (plagioclase, clinopyroxene and titanomagnetite) using electron backscatter diffraction (EBSD).



## 2. Geological settings and petrology.

The La Palisse basaltic lava flow is located in the Bas-Vivarais volcanic province, in the East part of the French Massif Central (Fig.1a). This volcanic activity of the Bas-Vivarais volcanic province is characterized by alternated phreatomagmatic eruptions and strombolian activity and is spread over a large time interval, from  $166 \pm 15$  ka to  $45.4 \pm 3.2$  ka (Guérin and Gillot 2007). The lava flow belongs to an eruptive episode occurring around  $78.8 \pm 5.3$  ka (Guérin and Gillot 2007). Its emission source is at the Suc de Bauzon scoria cone, from which the flow went NW into the Loire paleo-valley which was incised in the granitic substratum (Fig. 1b). The thickness of the flow is  $\approx 40$  meters at the sampling sites.

Two sampling sites were selected to address distinct structural levels of the flow. In sampling site 1, the colonnade and the entablature are clearly observed. The apparent thickness of the colonnade ranges from less than 1 m to about 3 m. Columns are vertical, oriented perpendicularly to the horizontal substratum surface and have a mean width of 0.4 m. In the entablature level, in which thickness ranges from 6 m to 12 m, columns are randomly oriented and only a few centimeters in width. In sampling site 2, three zones can be distinguished from base to top of (Fig. 2): the colonnade, an intermediate zone presenting planar layering and hereafter referred to as layered zone, and the pseudo-colonnade. The respective thicknesses of the three zones are 4, 2 and 2 m. The intermediate zone differs from the entablature level of site 1 by its planar structure. The strike of volcanic layers is NE-SW with a  $50^\circ$  dip to NW (Fig. 2). Because the La Palisse basalt flow is channeled by a paleo-valley, the underlying paleosurface, currently not outcropping, is assumed sub-horizontal at site 1 and parallel to the layered zone at site 2.

Regardless of the structural level, the lava flow samples contain phenocrysts and xenocrysts of olivine, phenocrysts of clinopyroxene, microphenocrysts (500 to  $50\ \mu\text{m}$  in size) of plagioclase and a groundmass mainly composed of microlites of plagioclase, clinopyroxene and iron oxides within partially devitrified glass. The fluidal texture displayed by plagioclase microphenocrysts is observed in the different levels of the two sampling sites, whereas the pseudo-colonnade level exhibits a more vesicular texture.

The La Palisse lava is basanite (TAS, *Le Bas et al.*, 1986), The mean composition of phenocrysts are An50 for plagioclase, Fo78 for olivine and diopside for clinopyroxene (*Boiron*, 2011). The

oxide grains are mainly Ti-rich titanomagnetite ( $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$  with  $x$  mean value of 0.6)(Boiron, 2011).

### 3. Methods

#### 3.1. Magnetic methods

The anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) was measured with a KLY-3 instrument at the Laboratoire de Géosciences, Montpellier, France. Thermomagnetic experiments were conducted under argon atmosphere, with a CS4 furnace coupled to a MFK1 Kappabridge instrument at the University of Saint Étienne. AMS in low magnetic field ( $< 1\text{mT}$ ) is mathematically described as a symmetric second rank tensor, which can be geometrically expressed as an ellipsoid with three principal susceptibility axes ( $K_1$ ,  $K_2$  and  $K_3$  with  $K_1 \geq K_2 \geq K_3$ ). For magnetite, AMS is controlled by the shape-preferred orientation (SPO) of individual grains or aggregates (Rochette et al.; 1992). Many parameters are usually employed to describe the AMS fabric of rocks. In this paper, we used the bulk magnetic susceptibility  $K_m = (K_1 + K_2 + K_3)/3$ , the corrected degree of anisotropy (Jelinek 1981)  $P' = \exp\left[2(\eta_2 - \eta_m)^2 + (\eta_2 - \eta_m)^2\right]^{\frac{1}{2}}$ , where  $\eta_1 = \ln K_1$ ,  $\eta_2 = \ln K_2$ ,  $\eta_3 = \ln K_3$  and  $\eta_m = (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3)/3$ , and the shape parameter (Jelinek 1981) defined as  $T = (2\eta_2 - \eta_1 - \eta_3)/(\eta_1 - \eta_3)$ . The  $P'$  parameter is used to quantify the degree of magnetic anisotropy and  $T$  characterizes the AMS ellipsoid shape.  $T$  ranges from -1 (prolate magnetic fabric) to +1 (oblate magnetic fabric). Magnetic hysteresis and first order reversal curve (FORC) were measured on a Vibrating Sample Magnetometer Princeton Measurements 3900-04, at the University of South Illinois, Carbondale (USA). The anisotropy of anhysteretic remanent magnetization (A-ARM) measurements were carried out by three steps using a 2G cryogenic SQUID magnetometer with an alternating field (AF) demagnetizer at the University of Montpellier (France). The sample was first AF demagnetized along three perpendicular axes with a maximum magnetic field of 170 mT. In a second time, an ARM is acquired along a direction perpendicular to the last demagnetized axis with a bias direct field of 30  $\mu\text{T}$  and AF of 120 mT. In the third step, the induced ARM was measured. These three steps are repeated for 6 positions following the sequence, +X, +Y, +Z, -X, -Y, and -Z.

#### 3.2. Lattice-preferred orientation (LPO) and shape-preferred orientation (SPO) methods

The LPO of plagioclase, clinopyroxene and titanomagnetite was measured by indexation of electron-backscattered diffraction patterns (EBSD) with a Zeiss Supra 55 VP SEM at the École nationale supérieure des mines of Saint-Étienne, France. EBSD patterns are generated by interaction of a vertical incident electron beam with a carefully polished thin section tilted at 70°. The diffraction patterns are processed and indexed in terms of crystal orientation using the CHANNEL5 software from HKL, Oxford Instruments. Crystallographic orientations were measured grain-per-grain using an accelerating voltage of 20 kV, a working distance of 15 mm, a current intensity of 26  $\mu$ A and a pressure of 15 Pa. The diffraction images indexation was based on crystallographic data of respectively: Wechsler et al. (1984) for titanomagnetite, Wenk et al. (1980) for plagioclase and Bertolo et al. (1994) for clinopyroxene.

Image analysis was performed on thin sections from 6 digital images in cross-polarized light with different angles (from 0° to 150°) using a binocular microscope equipped with colour CCD. The images were then combined in a single image in order to obtain a maximal amount of lighted minerals. Single images were then digitized and processed and the SPO was calculated using the intercept method of modified by Launeau and Robin (1996) to define the rose of mean length intercepts as an ellipse equivalent to the mean shape fabric. A combination of three ellipses taken on three perpendicular sections is used to calculate the best ellipsoid with the Robin (2002) method following the procedure of Launeau and Robin (2005) modified by Launeau et al. (2011) (see also Launeau (2004) and <http://www.sciences.univ-nantes.fr/lpgnantes/SPO>).

#### **4. Magnetic mineralogy**

The mode of titanomagnetite grains, determined by image analysis and reflected-light microscopy, is about 3% in volume (Fig. 3). Grains are subhedral in shape and exhibit a mean size around 10  $\mu$ m. The grains, observed through optical microscopy and SEM, appear free of exsolutions.

Thermomagnetic curves were performed on basaltic powder coming from sampling at different levels of the flow (Fig. 4). Curves are generally reversible and the mean Curie temperature ( $T_C$ ) ranges from 100°C to 140°C. These low  $T_C$  attest of the high titanium content of titanomagnetite, with an average composition of  $\text{Fe}_{2.4}\text{Ti}_{0.6}\text{O}_4$  (Dunlop and Özdemir 1997, Lattard et al., 2006).

This composition is in agreement with microprobe data. Thermomagnetic analyses further suggest that the titanomagnetite grains are rather homogeneous in composition

The hysteresis parameters were measured on 26 samples of the different levels from sites 1 and 2. Hysteresis curves clearly indicate the dominance of ferromagnetic minerals. The hysteresis curves are simple, no wasp-waisted shape being observed (Fig. 5a). The data in a plot of ( $M_{rs}/M_s$ ) versus ( $H_{cr}/H_c$ ) are consistent with data from other natural basaltic lava of similar composition (around  $x = 0.6$ ; Fig. 5b) (Hartstra 1982; O'Donovan et al. 1986) and are consistent with PSD domain (Dunlop, 2002). According to Dunlop (2002), the PSD grain size range is narrower for Ti-rich titanomagnetite than for magnetite and could extend from approximately 2 to 25  $\mu m$ . The observed hysteresis properties are ambiguous and could result from either an intermediate and homogeneous grain size between SD and MD grains, or from a mixture of various SD and MD grain sizes. In order to precise the potential contribution of single-domain grains, First Order Reveal Curves (FORC) diagrams were carried out on samples from site 1 and 2. FORCs are expressed by contour plots of a two-dimensional distribution function and they provide an accurate mean to reveal information on the different components in a mixed magnetic mineral assemblage (Pike et al. 1999; Roberts et al. 2000). FORC diagrams obtained from 4 samples from the colonnade (08tb12 and 08tb18, site 1) and from the layered zone (08tb59 and 08tb68, site 2) are provided on Fig. 6. The outer contours diverge from the  $H_u = 0$  axis and intersect the  $H_c = 0$  axis whereas the inner contours are less divergent. The absence of any central peak in the four FORC diagrams confirms a very small contribution of SD particles (Roberts et al., 2000) and suggests a dominating PSD + MD mixing in the samples.

## **5. Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS)**

### ***5.1. AMS scalar parameters***

For site 1, the anisotropy degree  $P'$  is higher in the entablature level ( $P'$  mainly ranges from 1.03 to 1.11) than in the colonnade level ( $P'$  mainly ranges from 1.01 to 1.08) whereas the mean susceptibility  $K_m$  is lower in the entablature ( $K_m$  mainly ranges from  $4.1 \cdot 10^{-2}$  SI to  $5.3 \cdot 10^{-2}$  SI) than in the colonnade ( $K_m$  mainly ranges from  $4.9 \cdot 10^{-2}$  SI to  $5.8 \cdot 10^{-2}$  SI) (Fig. 7a). In the entablature level, the distribution of the shape parameter ranges around a value of  $T = 0$ . On the contrary, the shape parameter is more scattered in the colonnade (Fig. 7b). For site 2, the range of  $P'$  values of the pseudo-colonnade is narrower (around 1.03) than for colonnade and layered

zone, from 1.02 to 1.06 and from 1.01 and 1.08, respectively. The mean susceptibility  $K_m$  is similar for the colonnade and the layered zone ( $5.0 \cdot 10^{-2} \text{ SI} < K_m < 6.1 \cdot 10^{-2} \text{ SI}$ ) whereas it is lower in the pseudo-colonnade ( $4.3 \cdot 10^{-2} \text{ SI} < K_m < 5.0 \cdot 10^{-2} \text{ SI}$ ) (Fig. 7c). The shape parameter  $T$  for the layered zone and the colonnade is scattered in oblate and prolate domains with a larger number of data for the oblate shape. Pseudo-colonnade mainly spans the oblate domain ( $0.2 < T < 0.7$ ) (Fig. 7d).

## 5.2. AMS fabrics

AMS fabrics measured in the different flow levels of sites 1 and 2 are presented on stereograms in the geographic referential (Fig. 8). In all stereograms, the AMS eigenvectors ( $k_1 \geq k_2 \geq k_3$ ) are well grouped with narrow confidence ellipse and therefore the mean of principal susceptibility axes is statistically significant. The  $k_3$  axes for site 1 are particularly well grouped and the mean  $K_3$  direction for the colonnade and the entablature are closed. Maximum and intermediate axes are also well grouped but seem to be inverted between the colonnade and the entablature. For site 2, the minimum susceptibility axes remains the most grouped for all levels. The orientation of the mean principal susceptibility axes ( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ) is similar in the colonnade and the layered zone but different for the pseudo-colonnade.

The determination of flow direction and flow sense from AMS fabrics is obtained by means of the imbrication of the magnetic foliation with a sub-horizontal paleosurface for site 1. For site 2 the paleosurface is assumed to be parallel to the layered zone (NE-SW in direction and  $50^\circ\text{NW}$  for the plunge; Fig. 8). The flow direction is given by the pole of the paleosurface plane and the pole of magnetic foliation (i.e., the minimum principal axis  $K_3$ ). The angle between  $K_3$  and the paleosurface defines the imbrication angle that allows determining the flow sense (Geoffroy et al.; 2002). For site 1, flow direction and flow sense deduced from AMS are consistent with field observations, both for the colonnade and the entablature. Similarly, for site 2 a good correlation between flow direction deduced from AMS and from field observations is obtained, considering an opposite imbrication for the pseudo-colonnade located on the top of the flow. However, it must be noted that the flow sense deduced from AMS is opposed to field observations. The expected AMS diagram for site 2 with respect to the field geological evidences and the coherent AMS measurements for site 1, suggest an inversion between the maximum and the minimum axis for the colonnade and the layered zone of site 2.



## 6. Magnetic and Crystallographic fabrics

### 6.1. Lattice preferred orientation

The LPO of plagioclase, clinopyroxene and titanomagnetite are presented on equal area and lower hemisphere projections in the specimen reference framework for the colonnade and the entablature of site 1 (Fig. 9a) and for the colonnade, the layered zone and the pseudo-colonnade of site 2 (Fig. 9b, c). Density contours are expressed in multiple uniform distribution (MUD) using the software PFch5 by David Mainprice ([ftp://www.gm.univmontp2.fr/mainprice//CareWare\\_Unicef\\_Programs/](ftp://www.gm.univmontp2.fr/mainprice//CareWare_Unicef_Programs/), Laboratoire Géosciences, Montpellier, France). The fabric strength is expressed by the texture index  $J$  (Bunge 1982), which ranges from 1 in the case of random orientation to  $\infty$  in the case of an ideal single crystal.

Plagioclase presents the highest fabric strength ( $4.5 < J < 5.8$ ). The plagioclase (010)-plane systematically shows the strongest maximum density. For site 1, (010)-maximum density values of plagioclase from the colonnade and the entablature are 4.40 and 5.37, respectively. Lower maximum density values are observed for (100)-plagioclase (3.68 and 4.38) and (001)-plagioclase (2.24 and 2.81). For site 2, maximum density values of (010)-plagioclase for the colonnade, the layered zone and the pseudo-colonnade are 4.91, 5.23 and 4.81, respectively, while lowest value are observed for the (100) and (001)-plagioclase. The highest (010)-plagioclase maximum density values are reached for the entablature of site 1 and for the layered zone of site 2. The highest values of the plagioclase fabric strength  $J$  are also reached in these zones (5.5 in the site 1 entablature and 5.8 in the site 2 layered zone). However, the site 2 colonnade and pseudo-colonnade present high fabric strengths as well ( $J > 5$ ).

Clinopyroxene LPO is not as strong as plagioclase LPO with a fabric strength  $J$  that ranges from 3.35 to 3.70. Maximum density values are generally lower than 3 except for the entablature and the layered zone for which the (001) plane is higher (3.73 and 3.63, respectively).

Close relationships are observed between crystallographic planes of plagioclase and clinopyroxene: (100)-plagioclase tends to be parallel to (001)-clinopyroxene and (010)-plagioclase tends to be parallel to (100)-clinopyroxene for the two sites and at all levels.

Finally, no clear preferred orientation can be deduced from the LPO of titanomagnetite, even considering maximum density values higher than 2. However, it can be noticed that [100]-titanomagnetite has the highest maximum density compared to [111] and [110]-titanomagnetite, especially for the colonnade at both site 1 and 2 (maximum density values of 2.30 and 2.49 respectively).

## ***6.2. Comparison between magnetic and crystallographic fabrics***

In order to precise the relationships between the plagioclase crystallographic preferred orientations and the AMS, we compared the orientation of  $k_1$ ,  $k_2$  and  $k_3$  axes with the plagioclase crystallographic fabrics on samples representative of the different flow levels. The principal susceptibility axes, as well as the best axes (eigenvectors) and the maximum density of (100), (010) and (001)-plagioclase were projected on lower hemisphere stereograms in the specimen referential (Fig. 10). For site 1, in both the colonnade and entablature levels, a clear correlation appears between the maximum susceptibility  $K_1$  and the best axis of (100)-plagioclase, between the minimum susceptibility  $K_3$  and the best axis of (010)-plagioclase and between the intermediate susceptibility  $K_2$  and the best axis of (001)-plagioclase. For site 2, relationships are less obvious: (100)-plagioclase is related to  $K_3$  in the pseudo-colonnade, but related to  $K_2$  in the layered zone and (001)-plagioclase only presents a clear correlation with  $K_2$  in the pseudo-colonnade. The (010)-plagioclase axis shows high orientation correlations with  $K_1$  in the three flow levels.

## **7. Discussion**

### ***7.1. Relation between AMS and flow***

The results of the present study show that the use of AMS to determine the flow direction, which is largely employed in dykes (e.g., Knight and Walker, 1988, Geoffroy et al., 2002), is also efficient in lava flows. We can notice that neither the maximum of magnetic susceptibility axis itself nor the imbrication of the magnetic lineation allow to find a flow direction that fit with the flow direction deduced from field evidences. The magnetic foliation imbrication appears as the best mean to obtain an accurate flow direction even in the case of opposed imbrication between the base and the top of the flow (site 2). These results are consistent with previous AMS studies

of lava flows (Saint-Thibéry; Bascou et al., 2005). Concerning the flow sense, our results are contrasted. For site 1, the flow sense deduced from AMS coincides with the field observations, whereas for site 2, they are systematically opposed. The flow sense deduced from AMS for site 2 appears to coincide with a permutation between the minimum and the maximum axes compared to site 1. The origin of the inversion of AMS axes is discussed in a following part.

## **7.2. Origin of AMS**

Magnetic anisotropy of volcanic rocks can result from different intrinsic properties of minerals such as: magnetocrystalline anisotropy, shape anisotropy and a non-intrinsic property as the distribution anisotropy that results from magnetic interaction between ferromagnetic grains (Hargraves et al. 1991). Petrographical observations indicate that the titanomagnetite grains, which are the main carrier of the AMS in the La Palisse basalt flow, are subhedral. As a consequence, shape anisotropy of individual grains can be neglected. In addition, titanomagnetite LPO is randomly oriented that excludes a magnetocrystalline anisotropy, in particular a preferred orientation of [100]-titanomagnetite that corresponds to the best magnetization axis (Dunlop and Özdemir 1997). For lava flow, experimental studies of Hargraves et al. (1991) indicate that AMS can be produced from an anisotropy distribution of ferromagnetic particles constrained by a silicate “template”.

Image analysis based on 2D and 3D images was performed in order to precise the relationships between crystallographic and magnetic fabrics. The shape ellipse from image analysis is shown for site 1 (colonnade) where AMS signature is coherent with field flow direction and sense and for site 2 (pseudo-colonnade) where an inversion between  $k_1$  and  $k_3$  is observed (Fig. 11).

For site 1, magnetic fabric, SPO and LPO of plagioclase show close relationships.  $k_1$  (the magnetic lineation) is parallel to plagioclase-(100) and also parallel to the lath of plagioclase alignment. The “magnetic foliation” (plane perpendicular to  $k_3$ ) is parallel to plagioclase-(010) and corresponds to the flow plane (Fig.11a). These relationships between magnetic and the related flow crystallographic preferred orientation of plagioclase are totally coherent with the crystal habitus ‘in lath’ of plagioclase. The tight relationships between the crystallographic (LPO and SPO) and magnetic fabrics strongly suggest that plagioclase laths mainly control the spatial distribution of titanomagnetite grains, carrier of the AMS. In addition, EBSD analyses show that clinopyroxene and plagioclase LPO are coaxial and therefore, both flow related. Plagioclase and

clinopyroxene could constitute a silicate framework that constrains the spatial distribution of titanomagnetite grains. These results are in accordance with the experimental studies of Hargraves et al. (1991) and observations in natural flow by Bascou et al. (2005).

For site 2, magnetic and crystallographic fabrics are also coaxial. However, contrary to site 1, relationships between AMS and crystallographic axes differ between the different levels, except for  $k_1$  that systematically coincide to the plagioclase-(010) maximum of density (Fig.10). In the pseudo-colonnade we observe the permutation of  $k_1$  with  $k_3$  compared to the AMS fabrics of site 1. The (100)-plagioclase tends to be parallel to  $k_3$  and to the long axis of the shape fabric (SPO), and the (010)-plagioclase tends to be parallel to  $k_1$  and the short axis of the shape fabric (Fig. 11b).

### ***7.3. Inverse AMS fabrics of La Palisse flow***

Distinctive AMS fabrics from those measured for site 1, which are considered normal because of their agreement with field observations and relationships with plagioclase (and clinopyroxene) crystallographic fabrics, are observed in the different levels of site 2. For the colonnade and the layered zone of the site 2, a systematic permutation of  $K_1$  and  $K_3$  axes could allow to define a flow sense conform to the field evidences. Such inversion between  $K_1$  and  $K_3$  is defined as an inverse magnetic fabric. Such fabric has already been described in other contexts and several explanations have been proposed for their occurrence. For example, Rochette et al. (1999), Potter and Stephenson (1988) and Borradaile and Puumala (1989) have proposed that inverse fabrics result from the presence of Single Domain titanomagnetite grains within the rocks. Crystallization of secondary magnetic oxides in residual magma or as a result of hydrothermal alteration has also been evoked to be at the origin of ferromagnetic SD grain crystallization and therefore of inverse fabrics (Archanjo et al. 2002)

In the La Palisse basalt flow, the absence of Single Domain grains is highlighted by hysteresis parameters and FORC diagrams, both indicating a large and homogenous grain size of ferromagnetic grains in the two sites and in all levels of the flow. Thus, the inverse magnetic fabrics cannot be explained by the presence of small SD magnetic grains. The great homogeneity in size and shape of the titanomagnetite grains also excludes crystallization of secondary oxides during hydrothermal alteration processes. In addition, electron microprobe and thermomagnetic curves indicate that Ti-rich titanomagnetite grains are homogeneous in composition and the only

carrier of AMS. The magnetic mineralogy study of the La Palisse basaltic lavas tends to exclude the presence of SD ferromagnetic grains as the cause of the inverse fabric. However, as underlined by Chadima et al. (2009), several studies have shown obvious inverse fabric in dikes whereas the magnetic grain size study from hysteresis measurements did not reveal SD grains evidences (e.g., Callot et al., 2001; DeFrates et al., 2006). Chadima et al. (2009) proposed to measure the anisotropy of magnetic remanence (AMR) when the presence of SD grains is supposed. In case of inverse AMS fabric, AMR shows a permutation of AMS maximum and minimum direction. In order to check the presence of these SD grains in the La Palisse samples, ARM measurements were performed (Fig. 12). AMR fabrics of the studied samples are characterized by  $k_1$  parallel to  $A_1$  (maximum of AMR) and therefore indicate no permutation between AMR and AMS fabrics. These results confirm that inverse AMS fabric is not a consequence of SD grain occurrence.

Others factors could generate inverse fabric, such as the orientation of the paleosurface and its slope, the shear stress that can have a different intensity across the flow, or even the rheology. C  n  n-Tapia et al. (1995; 1996; 1997) indicate that the morphology of a lava flow is strongly controlled by the rheology and the slope of the pre-existing terrain. The maximum of susceptibility axes are more scattered and sometimes even perpendicular to the flow direction when the slope of paleosurface is very weak whereas less scattered maximum axes are observed with a stronger slope. When the shear stress is important, the foliation development promotes an orientation of the minimum axis  $K_3$  perpendicular to the shear plane. On the contrary, in the case of weaker shear stress, the magnetic fabric is preferentially lineated and the maximum axis tends to be perpendicular to the shear plane. Analogue modeling confirms the influence of the shear stress or stretching direction during the emplacement of lava flows on the magnetic fabric and the degree of anisotropy (Merle 1998; Canon-Tapia and Pinkerton 2000). However, we do not observe significant difference of magnetic anisotropy values ( $P'$ ) between the both sites for the same level (e.g., the colonnade).

Finally, the viscosity of the lava during emplacement can also have a great influence on the degree of anisotropy as shown by Hrouda et al. (2005). Such geological causes could explain the colonnade and the layered zone inverse fabrics of site 2.

## 8. Conclusions



In this AMS study, we show that the determination of the flow direction and the sense can be achieved through the use of the magnetic foliation imbrication. Contrary to others studies that base the AMS analysis on the  $K_1$  directions (with or without imbrication), the measurements on the La Palisse lava flow highlight the poor reliability of magnetic lineation. This can easily induce inversion between  $K_1$  and  $K_2$  during the flow.

EBSD data show clear correlations between plagioclase and clinopyroxene LPO: (100)-plagioclase tends to be parallel to (001)-clinopyroxene and (010)-plagioclase tends to be parallel to (100)-clinopyroxene. In addition, LPO orientations, and also shape preferred orientations of plagioclase show tight relations with principal AMS directions. For site 1, at the specimen scale, (010)-plagioclase is parallel to the magnetic foliation ( $K_1$ ,  $K_2$ ) and coincides to the flow plane, and the pole of (100)-plagioclase is parallel to  $K_1$  and coincide the flow direction indicated by the preferred alignment of the plagioclase laths. These close relationships between crystallographic and magnetic fabrics suggest a control of the silicate framework (plagioclase and clinopyroxene) on AMS carried by the titanomagnetite grains.

For both sampling sites (sites 1 and 2), the flow direction deduced from AMS is consistent with field evidences. However, only AMS in site 1 allows determining the geological flow sense. For site 2, the flow sense is systematically opposed to the geological flow sense. Relations between AMS and LPO are systematically different of those of site 1: (010)-plagioclase is always parallel to  $k_1$  for the three levels; (100)-plagioclase is parallel to  $k_3$  for pseudo-colonnade whereas the layered zone and colonnade do not indicate other clear relations.

Petrographic observation, thermomagnetic curves as well as hysteresis parameters indicate that magnetic minerals are mainly subhedral Ti-rich titanomagnetite grains belonging to Multi Domain and Pseudo-Single Domain. FORC diagrams confirm the absence of Single-Domain grains in the samples. Therefore, the permutation between  $K_1$  and  $K_3$  axes cannot be related to the presence of SD grains that is confirming by AMR measurements.

Magnetic susceptibility parameters ( $P'$  and  $K_m$ ) are relatively similar for the two sites, except in the entablature of site 1 where the anisotropy degree ( $P'$ ) is higher than in the other levels. We also observe that the layered zone (site 2) is not the equivalent of the entablature (site 1), although both are located in the middle part of the flow.

The main difference between site 1 and site 2 concerns the paleosurface slope, very gently for site 1 and high ( $50^\circ$ ) slope for site 2 as indicated by the layered zone inclination and the tilt of

the columns. Inverse fabrics of site 2 may be then due to other factors than magnetic grain size such as viscosity or the paleosurface slope during the emplacement of the flow. However, additional analyses are needed to determine precisely which of these factors exerted the main control on the permutation of AMS axes.

If AMS appears as an efficient tool to reveal the structure of basalt flows and to deduce the flow direction, our study supports that inverse magnetic fabrics can occur even in the absence of Single Domain grains. Recently, Chadima et al. (2009) proposed to use preferably AMR rather than AMS fabric to determine flow direction and tectonic interpretations of magnetic fabric in dikes. However, this technique remains less usual than the measurement of AMS, which has become a common tool in rock magnetism. In lava flows, AMS measurements coupled with punctual analyses such as LPO obtained through EBSD or SPO deduced from image analysis could allow preventing misinterpretations based on AMS fabrics alone.

### **Acknowledgements:**

The authors thank C. Cortial from the “Groupe géologique de la Haute-Loire” for his participation in the field prospection and B. Aneesa Lehman (Department of Geology, Southern Illinois University) for the hysteresis measurements. G. Hoareau helped improving the manuscript.

### **References:**

- Archanjo, C., Araujo, M. and Launeau, P., 2002. Fabric of the Rio Ceará–Mirim mafic dike swarm (northeastern Brazil) determined by anisotropy of magnetic susceptibility and image analysis. *Journal of Geophysical Research*, 107(B3).
- Aubele, J.C., Crumpler, L. and Elston, W.E., 1988. Vesicle zonation and vertical structure of basalt flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 35(4), 349-374.
- Bascou, J., Camps, P. and Dautria, J., 2005. Magnetic versus crystallographic fabrics in a basaltic lava flow. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 145(1-2), 119-135.

- Bertolo, S., Nimis, P. and Dal Negro, A., 1994. Low-Ca augite from experimental alkali basalt at 18 kbar; structural variation near the miscibility gap. *American Mineralogist*, 79(7-8), p.668-674.
- Boiron, T. (2011), Étude multi-échelle des variations structurales, géochimiques et des propriétés magnétiques des coulées basaltiques prismées : exemple de la coulée La Palisse (Ardèche) et de Saint-Arcons-d'Allier (Haute-Loire). PhD Thesis, Université de Lyon, Saint-Etienne.
- Borradaile, G.J and Puumala, M., 1989. Synthetic magnetic fabrics in a plasticene medium. *Tectonophysics*, 164(1), p.73-78.
- Borradaile, G.J. and Henry, B., 1997. Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy. *Earth-Science Reviews*, 42(1-2), 49-93.
- Borradaile, G.J., Jackson, M., 2004. Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS), magnetic petrofabrics of deformed rocks. In: Martín-Hernandez, F., Lünenburg, C.M., Aubourg, C., Jackson, M. (Eds.), Magnetic Fabrics. *Geological Society of London Spec. Publ.* No, 238, pp. 299-360
- Bouchez, J.-L., 2000. Anisotropie de susceptibilité magnétique et fabrique des granites. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 330(1), 1-14.
- Bunge, H.J., 1982. Texture analysis in materials science, Butterworths London. 593 pp.
- Callot, J.P, Geoffroy, L, Aubourg, C, Pozzi, J.P, Mege, D , 2001. Magma flow directions of shallow dykes from the East Greenland volcanic margin inferred from magnetic fabric studies. *Tectonophysics*, 335(3-4), 313-329.
- Callot, J.P. and Guichet, X., 2003. Rock texture and magnetic lineation in dykes: a simple analytical model. *Tectonophysics*, 366(3-4), 207-222.
- Canon-Tapia, E., Walker, G.P.L., Herrero-Bervera, E., 1995. Magnetic fabric and flow direction in basaltic pahoehoe lava of Xitle Volcano, Mexico. *of Volcanology and Geothermal Research*, 65, 249– 263.

- Cañón-Tapia, E., Walker, G.P.L and Herrero-Bervera, E., 1996. The internal structure of lava flows - Insights from AMS measurements .1. Near-vent a'a. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 70(1-2), 21-36.
- Cañón-Tapia, E., Walker, G.P.L and Herrero-Bervera, E., 1997. The internal structure of lava flows - Insights from AMS measurements .2. Hawaiian pahoehoe, toothpaste lava and 'a'(a)over-bar. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 76(1-2), 19-46.
- Cañón-Tapia, E. and Pinkerton, H., 2000. The anisotropy of magnetic susceptibility of lava flows: an experimental approach. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 98(1-4), 219-233.
- Cañón-Tapia, E., 2004. Anisotropy of magnetic susceptibility of lava flows and dykes: A historical account. *Geological Society, London, Special Publications*, 238(1), 205-225.
- Chadima, M., Cajz, V. and Týcová, P., 2009. On the interpretation of normal and inverse magnetic fabric in dikes: Examples from the Eger Graben, NW Bohemian Massif. *Tectonophysics*, 466(1-2), 47-63.
- Day, R., Fuller, M. and Schmidt, V.A., 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 13(4), 260-267.
- DeFrates, J., Malone, D. and Craddock, J., 2006. Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) analysis of basalt dikes at Cathedral Cliffs, WY: implications for Heart Mountain faulting. *Journal of Structural Geology*, 28(1), 9-18.
- Dragoni, M., Lanza, R. and Tallarico, A., 1997. Magnetic anisotropy produced by magma flow: Theoretical model and experimental data from Ferrar dolerite sills (Antarctica). *Geophysical Journal International*, 128(1), 230-240.
- Dunlop, D.J. and Özdemir, Ö., 1997. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*, Cambridge University Press, New York, 573 pp.
- Dunlop, D.J., 2002. Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr /Hc)1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *Journal of Geophysical Research*, 107(B3).

- Ferré, E.C. and Ameglio, L., 2000. Preserved magnetic fabrics vs. annealed microstructures in the syntectonic recrystallised George granite, South Africa. *Journal of structural geology*, 22(8), 1199-1219.
- Ferré, E.C., 2002. Theoretical models of intermediate and inverse AMS fabrics. *Geophysical Research Letters*, 29(7).
- Ferré, E., Teyssier, C., Jackson, M., Thill, J.W., Rainey, E.S.G., 2003. Magnetic susceptibility anisotropy: a new petrofabric tool in migmatites. *Journal of Geophysical Research*. 108 (B2).
- Geoffroy, L. Callot, J.P., Aubourg, C., Moreira, M., 2002. Magnetic and plagioclase linear fabric discrepancy in dykes: a new way to define the flow vector using magnetic foliation. *Terra Nova*, 14(3), 183-190.
- Gil-Imaz, A., Pocovi, A., Lago, M., Gale, C., Arranz, E., Rillo, C., Guerrero, E., 2006. Magma flow and thermal contraction fabric in tabular intrusions inferred from AMS analysis. A case study in a late-Variscan folded sill of the Albarracín Massif (southeastern Iberian Chain, Spain). *Journal of structural geology*, 28, 641– 653.
- Grégoire, V., de Saint Blanquet, M., Nédélec, A., Bouchez, J.L., 1995. Shape anisotropy versus magnetic interactions of magnetite grains: Experiments and application to AMS in granitic rocks. *Geophysical Research Letters*, 22(20), 2765–2768.
- Guérin, G. and Gillot, P., 2007. Nouveaux éléments de chronologie du volcanisme Pléistocène du bas Vivarais (Ardèche, France) par thermoluminescence. *Comptes Rendus Geosciences*, 339(1), 40-49.
- Hargraves, R.B., Johnson, D. and Chan, C.Y., 1991. Distribution anisotropy: The cause of AMS in igneous rocks? *Geophysical Research Letters*, 18(12), 2193–2196.
- Hartstra, R., 1982. Grain-size dependance of initial susceptibility and saturation magnetization-related parameters of 4 natural magnetites in the PSD-MD range. *Geophysical journal of the Royal astronomical society*, 71(2), 477-495.
- Henry, B., Jordanova, D., Jordanova, N., Souque, C., Robion, P., 2003. Anisotropy of magnetic susceptibility of heated rocks. *Tectonophysics*, 366(3-4), 241-258.

- Henry, B., Plenier, G., and Camps, P., 2003. Post-emplacement tilting of lava flows inferred from magnetic fabric study : the example of oligocene lavas in the Jeanne d'Arc Peninsula (Kerguelen islands), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 127(1-2), 153-164.
- Herrero-Bervera, E. Walker, G.P.L., Cañón-Tapia, E., Garcia, M.O., 2001. Magnetic fabric and inferred flow direction of dikes, conesheets and sill swarms, Isle of Skye, Scotland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 106(3-4), 195-210.
- Hrouda, F., 1992. Separation of a component of tectonic deformation from a complex magnetic fabric. *Journal of Structural Geology*, 14(1), p.65-71.
- Hrouda, F. Chlupacova, M., Schulmann, K., Smid, J., Zavada, P., 2005. On the effect of lava viscosity on the magnetic fabric intensity in alkaline volcanic rocks. *Studia Geophysica et geodaetica*, 49(2), 191-212.
- Jackson, M., 1991. Anisotropy of magnetic remanence: A brief review of mineralogical sources, physical origins, and geological applications, and comparison with susceptibility anisotropy. *Pure and Applied Geophysics*, 136(1), p.1-28.
- Jelinek, V., 1978. Statistical processing of anisotropy of magnetic susceptibility measured on groups of specimens. *Studia geophysica et geodaetica*, 22(1), 50-62.
- Jelinek, V., 1981. Characterization of the magnetic fabric of rock. *Tectonophysics*, 79(3-4), 63-67.
- Knight, M.D. and Walker, G.P.L., 1988. Magma Flow Directions in Dikes of the Koolau Complex, Oahu, Determined From Magnetic Fabric Studies. *Journal of Geophysical Research*, 93(B5), 4301–4319.
- Lattard, D, Engelmann, R., Kontny, A., Sauerzapf, U., 2006. Curie temperatures of synthetic titanomagnetites in the Fe-Ti-O system: Effects of composition, crystal chemistry, and thermomagnetic methods. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 111(B12).
- Launeau, P. and Robin, P.-F., 1996. Fabric analysis using the intercept method. *Tectonophysics*, 267(1-4), 91-119.



- Launeau, P. and Cruden, A.R., 1998. Magmatic fabric mechanisms in a syenite: results of a combined anisotropy of magnetic susceptibility and image analysis study. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 103, p. 5067-5089.
- Launeau, P., 2004. Mise en évidence des écoulements magmatiques par analyse d'images 2-D des distributions 3-D d'Orientations Préférentielles de Formes". *Bulletin de la. Société. Géologique de France* , 175, p. 331-350
- Launeau, P. and Robin, P.-Y. F., 2005. Determination of fabric and strain ellipsoids from measured sectional ellipses—implementation and applications. *Journal of Structural Geology*, 27, p. 2223-2233
- Launeau P., Archanjo C. J., Picard D., Arbaret L. & Robin P.Y., 2010. Two- and three-dimensional shape fabric analysis by the intercept method in grey levels. *Tectonophysics*, 492, p. 230-239
- Lebas, M.J., Lemaitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27(3), p.745 -750.
- Long, P.E. and Wood, B.J., 1986. Structures, Textures, and Cooling Histories of Columbia River Basalt Flows. *Geological Society of America Bulletin*, 97(9), p.1144-1155.
- Loock, S., Diot, H., Van Wyk de Vries, B., Launeau, P., Merle, O., Vadeboin, F., Petronis, M.S., 2008. Lava flow internal structure found from AMS and textural data: An example in methodology from the Chaîne des Puys, France. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(4), 1092-1104.
- Merle, O., 1998. Internal strain within lava flows from analogue modelling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 81(3-4), 189-206.
- O'Donovan, J., Facey, D. and O'Reilly, W., 1986. The magnetization process in titanomagnetite (Fe<sub>2.4</sub>Ti<sub>0.604</sub>) in the 1-30 µm particle size range. *Geophysical journal of the Royal astronomical society*, 87(3), 897-916.
- Park, J.K., Tanczyk, E.I. and Desbarats, A., 1988. Magnetic Fabric and Its Significance in the 1400 Ma Mealy Diabase Dykes of Labrador, Canada. *Journal of Geophysical Research*, 93(B11), 704.

- Petronis, M., and Geissman, J., 2009. Anisotropy of magnetic susceptibility data bearing on the transport of mid-tertiary regional ignimbrites, Candelaria Hills area, West-Central Nevada. *Bulletin of Volcanology*, 71, 121-151.
- Pike, C., Roberts, A. and Verosub, K., 1999. Characterizing interactions in fine magnetic particle systems using first order reversal curves. *Journal of Applied Physics*, 85(9), 6660-6667.
- Plenier, G., Camps P, Henry B, Ildefonse B., 2005. Determination of flow directions by combining AMS and thin-section analyses: implications for Oligocene volcanism in the Kerguelen Archipelago (southern Indian Ocean). *Geophysical Journal International*, 160(1), 63-78.
- Potter, D.K. and Stephenson, A., 1988. Single-domain particles in rocks and magnetic fabric analysis. *Geophysical Research Letters*, 15(10), 1097–1100.
- Raposo, M. and Berquo, T., 2008. Tectonic fabric revealed by AARM of the proterozoic mafic dike swarm in the Salvador city (Bahia state): Sao Francisco Craton, NE Brazil. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 167(3-4), 179-194.
- Roberts, A.P., Pike, C.R. and Verosub, K.L., 2000. First-order reversal curve diagrams: A new tool for characterizing the magnetic properties of natural samples. *Journal of Geophysical Research*, 105(B12).
- Robin, P.-Y.F., 2002. Determination of fabric and strain ellipsoids from measured sectional ellipses – Theory. *Journal of Structural Geology*, 24, p. 531-544.
- Rochette, P., Jackson, M. and Aubourg, C., 1992. Rock magnetism and the interpretation of anisotropy of magnetic susceptibility. *Reviews of Geophysics*, 30(3), 209–226.
- Rochette, P., Aubourg, C. and Perrin, M., 1999. Is this magnetic fabric normal? A review and case studies in volcanic formations. *Tectonophysics*, 307(1-2), 219-234.
- Smith J. V., 2002. Structural analysis of flow-related textures in lavas. *Earth-Science Reviews*, 57, 279-297.
- Staudigel, H., Gee, J., Tauxe, L., Varag, R.J, 1992. Shallow intrusive directions of sheeted dikes in the Troodos ophiolite: Anisotropy of magnetic susceptibility and structural data. *Geology*, 20(9), 841-844.

- Stephenson, A., Sadikun, S. and Potter, D., 1986. A theoretical and experimental comparison of the anisotropies of magnetic susceptibility and remanence in rocks and minerals. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 84(1), 185-200.
- Tarling, D.H., Hrouda, F., 1993. *The Magnetic Anisotropy of Rocks*, Chapman and Hall, London, 217pp.
- Ventura, G., De Rosa, R., Colleta, E., Mazzuoli R., (1996). "Deformation patterns in a high-viscosity lava flow inferred from the crystal preferred orientation and imbrication structures: an example from Salina (Aeolian Islands, southern Tyrrhenian Sea, Italy)." *Bulletin of Volcanology* **57**: 555-562.
- Wechsler, B.A., Lindsley, D.H. and Prewitt, C.T., 1984. Crystal structure and cation distribution in titanomagnetites (Fe (sub 3-x) Ti x O 4 ). *American Mineralogist*, 69(7-8), 754-770.
- Wenk, H.R., Lindsley, D., Prewitt, C.T., 1980. The average structure of An 62-66 labradorite. *American Mineralogist*, 65(1-2), 81-95.
- Zhu, R., Shi, C., Liu, Q., 2003. Anisotropy of magnetic susceptibility of Hannuaoba basalt, northern China: constrain on the vent position of the lava sequences. *Geophysical Research Letters* 30 (38,1-38,4)

## Figure Captions:

**Figure 1:** Location of the La Palisse basalt flow. (a) Location of the Bas-Vivarais volcanic region. Black area refers to the volcanic provinces of the French Massif Central, (b) Geological map of the studied area. Black arrows indicate the flow direction.

**Figure 2:** Outcrop of site 2. The various levels of the flow are indicated.

**Figure 3:** Reflected light photomicrograph of representative thin section from the colonnade of the La Palisse basalt flow (08tb14b sample). The white spots are mainly constituted of titanomagnetite grains (Ti-Mt). Pl = plagioclase, Px = pyroxene, Ol = olivine.

**Figure 4:** High temperature thermomagnetic curves of representative samples from the different levels of the La Palisse basalt for site 1 and 2. The thermomagnetic curves are commonly reversible and indicate a Curie temperature (Tc) of about 110°C associated to the Ti-rich titanomagnetite grains.

**Figure 5:** a) Representative hysteresis curves showing ferromagnetic grains. b) Mrs/Ms ratio versus Hcr/Hc ratio diagrams of samples from the different levels of site 1 (LP site 1) and site 2 (LP site 2). The limits of the pseudo-single domain of titanomagnetite (TM60) are defined by Dunlop (2002). Titanomagnetite experimental data are reported (Day et al., 1977). The titanomagnetite grains belong to

the pseudo-single domain (PSD) are consistent with data, also reported, from natural titanomagnetites (O'Donovan et al., 1986; Hartstra et al., 1982). Numbers indicate the grain size, C (coarse grain) and F (fine grain) for experimental data.

**Figure 6:** FORCs diagrams from site 1 colonnade (samples 08tb12 and 08tb18) and from site 2 layered zone (samples 08tb59 and 08tb68). These diagrams are characteristic of pseudo-single domain grains.

**Figure 7:** Diagrams representing the anisotropy parameter  $P'$  versus the bulk magnetic susceptibility ( $K_m$ ) for the different levels of site 1 (a) and site 2 (c). Diagrams of  $P'$  versus the shape parameter  $T$  are shown in (b) and (d) for site 1 and site 2, respectively.

**Figure 8:** Equal area projection in the lower hemisphere and geographical referential of the principal magnetic susceptibilities axes ( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ) measured in specimens from the different levels of the La Palisse flow for sites 1 and 2. The flow direction inferred from field observations is shown by the black arrow and the flow direction determined from AMS study is shown by the white arrow. The confidence ellipses are computed from Jelinek's statistics (Jelinek, 1978).  $N$  = number of measurements. For site 2, the layered flow plane is also presented in full line for layered zone and in dashed line for colonnade and pseudo-colonnade.

**Figure 9:** Lattice Preferred Orientation (LPO) of plagioclase, clinopyroxene and titanomagnetite of samples from the different levels of the La Palisse flow: (a) from the colonnade and the entablature of site 1, (b) from the colonnade and the layered zone of site 2 and (c) from the pseudo-colonnade of site 2. Equal area, lower hemisphere projection in the specimen coordinates system with the field measured sample angles  $X$  (the azimuth) and  $Z$  (the plunge). Contours are in Multiples of Uniform Distribution (MUD). The number beneath each plot expresses the maximum density (position marked by a small black square on pole figures); white triangle represents the Best Axis,  $J$  is the texture index and  $N$  the number of measurements. (d) Representative habitus of plagioclase, clinopyroxene and titanomagnetite single crystals.

**Figure 10:** Projection in the specimen referential (as Fig. 9) of maximum of density (MD-PI) and "Best Axis" (eigenvector) of plagioclase LPO for samples from the different flow levels. Density maximum of [111]-axes of titanomagnetite and mean eigenvectors  $K_1$ ,  $K_2$  and  $K_3$  are plotted.

**Figure 11:** (a) Projection of plagioclase LPO (maximum of density (MD-PI) and "Best Axis") and AMS fabrics in lower hemisphere and specimen referential of 08tb14b sample from the colonnade site 1, compared to the Shape Preferred Orientation (SPO) of plagioclase deduced from 2D image analysis (rose of direction). (b) Projection of plagioclase LPO, AMS and 3D plagioclase SPO of 08tb70b sample from the pseudo-colonnade site 2.

**Figure 12:** Principal directions of the AMS and AMR fabrics for samples from colonnade, layered zone and pseudo-colonnade, site 2 in the equal-area, lower-hemisphere projections in specimen coordinate system. The black and white symbols are AMS and AMR principal directions, respectively.

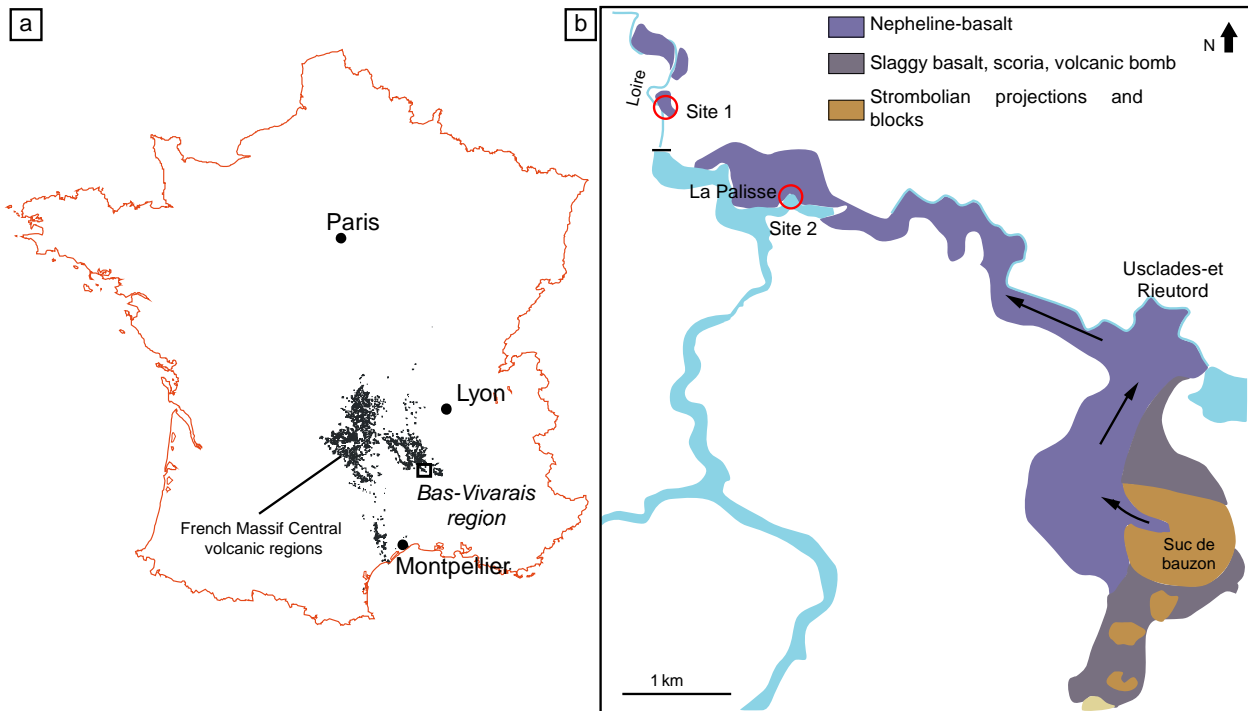


Figure 4- 1 : Location of the La Palisse basalt flow. (a) Location of the Bas-Vivaraïs volcanic region. Black area refers to the volcanic provinces of the French Massif Central, (b) Geological map of the studied area. Black arrows indicate the flow direction.

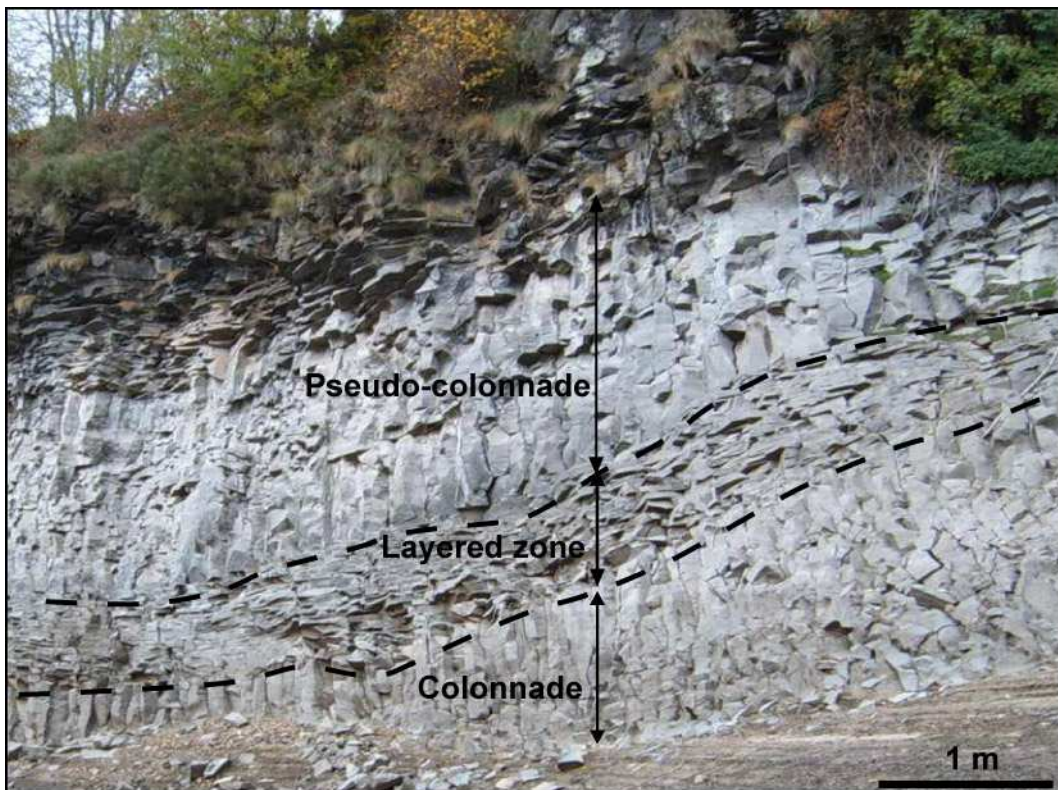


Figure 4- 2 : Outcrop of site 2. The various levels of the flow are indicated.



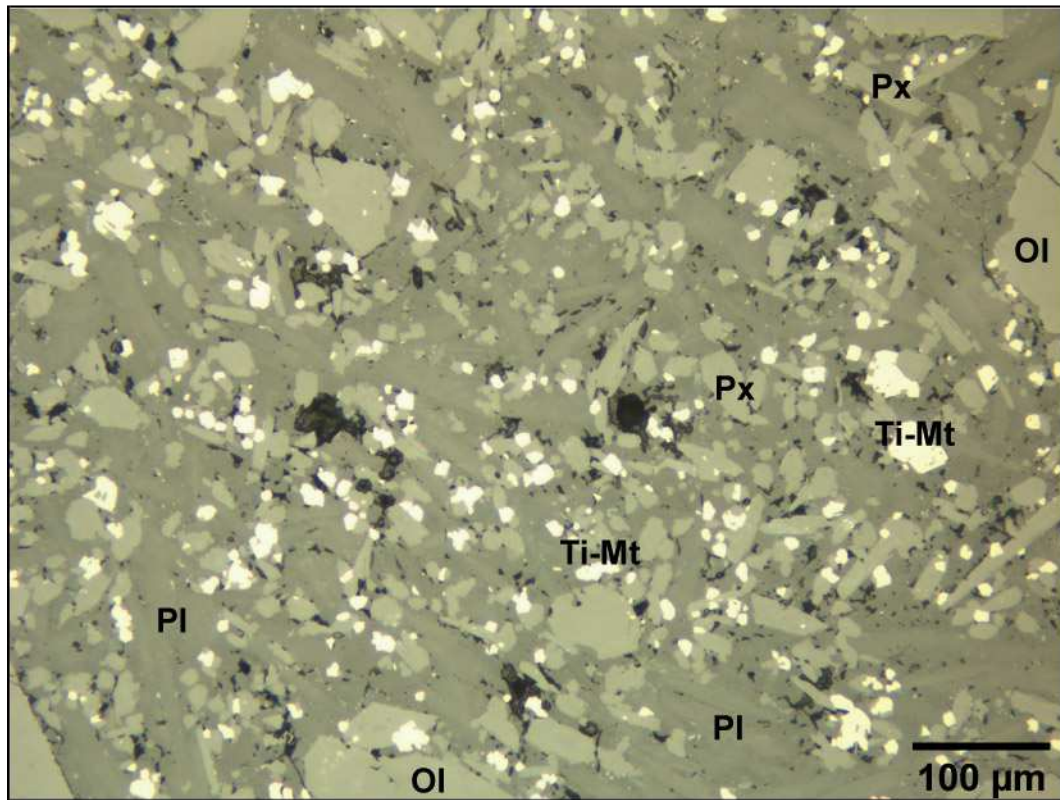
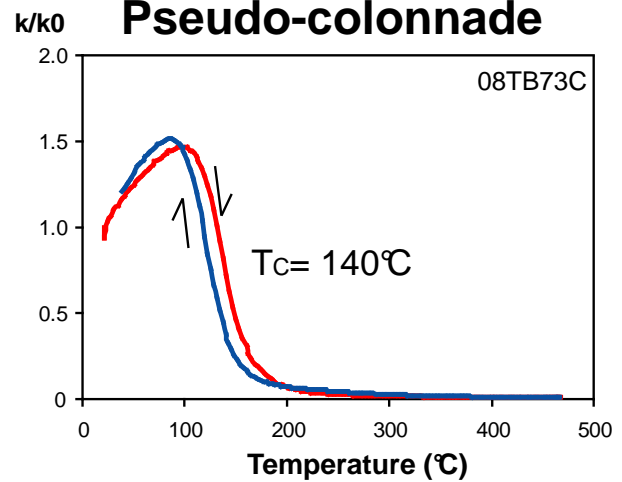


Figure 4- 3 : Reflected light photomicrograph of representative thin section from the colonnade of the La Palisse basalt flow (08tb14b sample). The white spots are mainly constituted of titanomagnetite grains (Ti-Mt). Pl = plagioclase, Px = pyroxene, Ol = olivine.



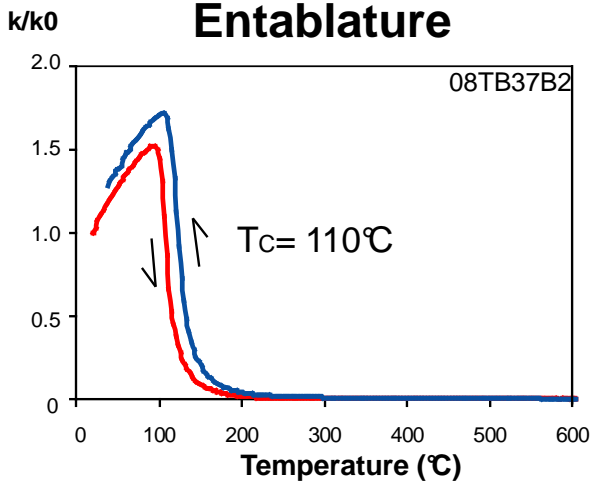
## Site 2

### Pseudo-colonnade

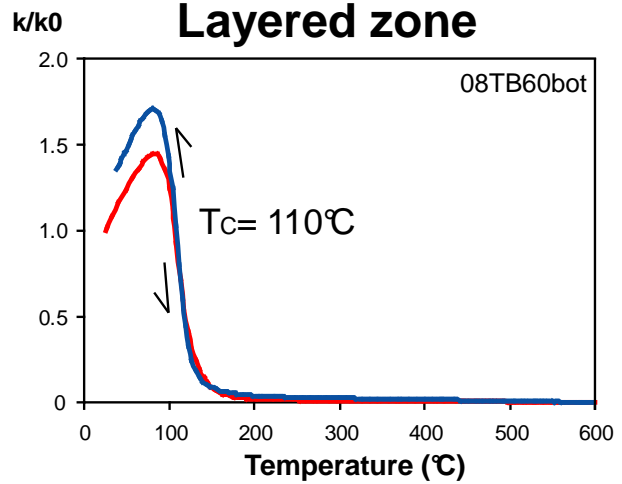


## Site 1

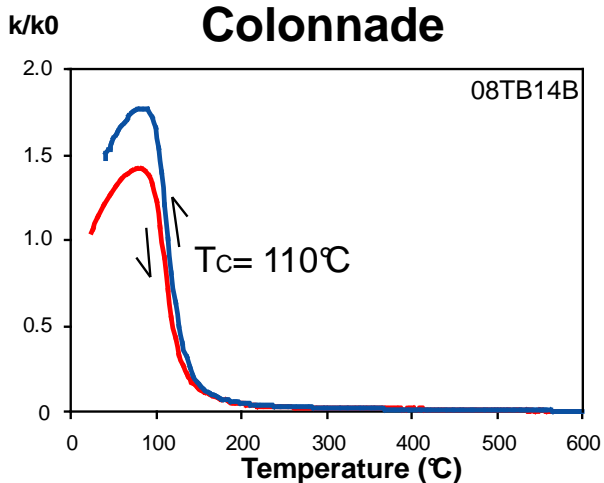
### Entablature



### Layered zone



### Colonnade



### Colonnade

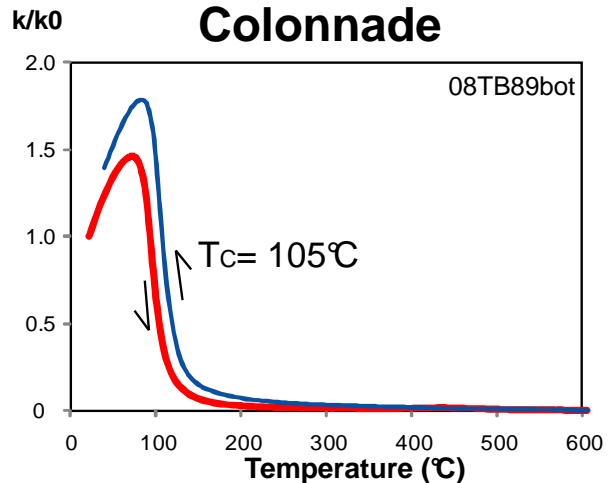


Figure 4- 4 : High temperature thermomagnetic curves of representative samples from the different levels of the La Palisse basalt for site 1 and 2. The thermomagnetic curves are commonly reversible and indicate a Curie temperature ( $T_C$ ) of about  $110^\circ\text{C}$  associated to the Ti-rich titanomagnetite grains.

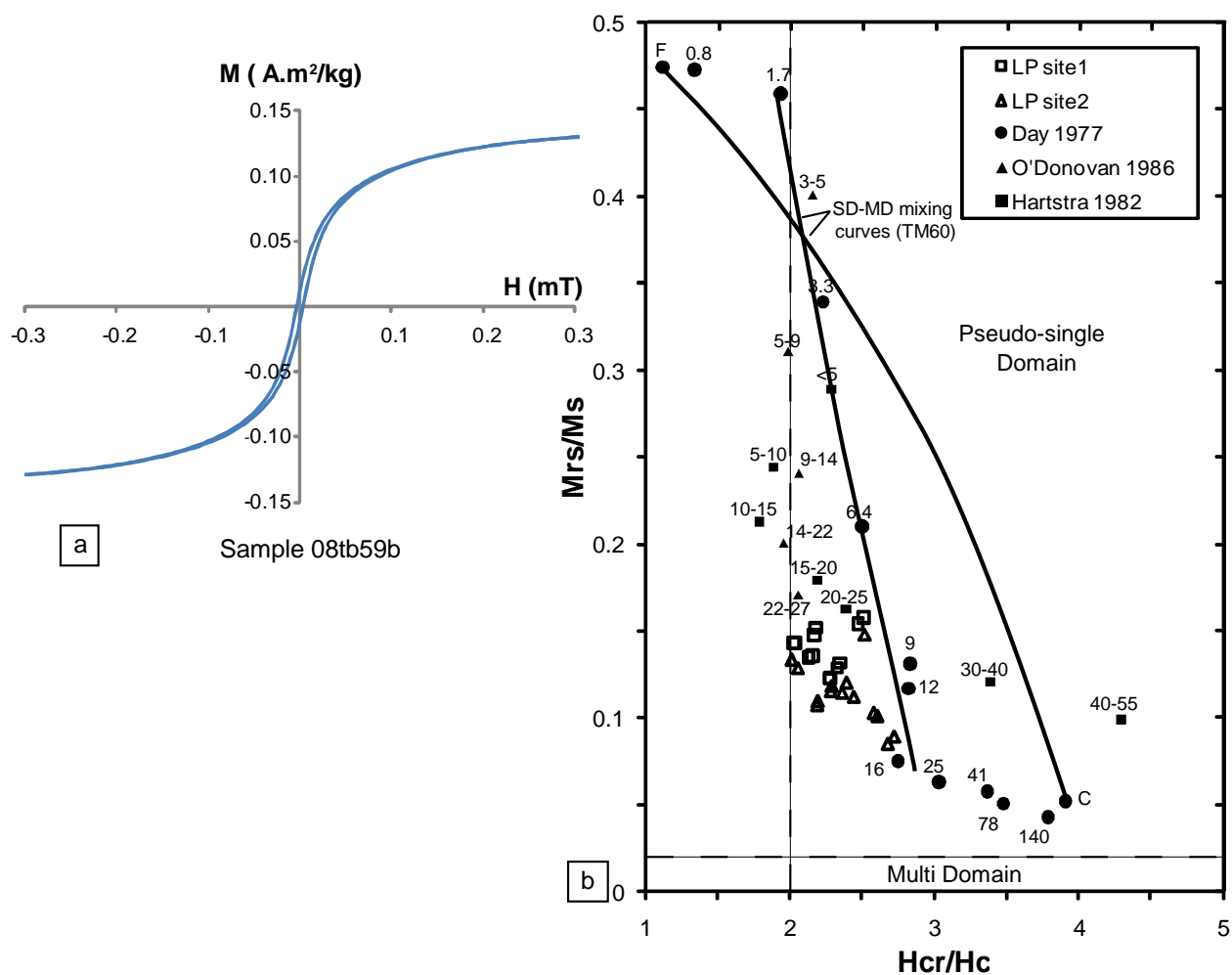


Figure 4- 5: Mrs/Ms ratio versus Hcr/Hc ratio diagrams of samples from the different levels of site 1 (LP site 1) and site 2 (LP site 2). The limits of the pseudo-single domain are  $0.02 < \text{Mrs/Mr} < 0.5$ , with multi domain  $\text{Mrs/Mr} < 0.02$  and single domain  $\text{Mrs/Mr} > 0.5$  (Dunlop, 2002). Titanomagnetite experimental data are reported (Day et al., 1977). The titanomagnetite grains belong to the pseudo-single domain (PSD) and are consistent with data, also reported, from natural titanomagnetites (O'Donovan et al., 1986; Hartstra et al., 1982).

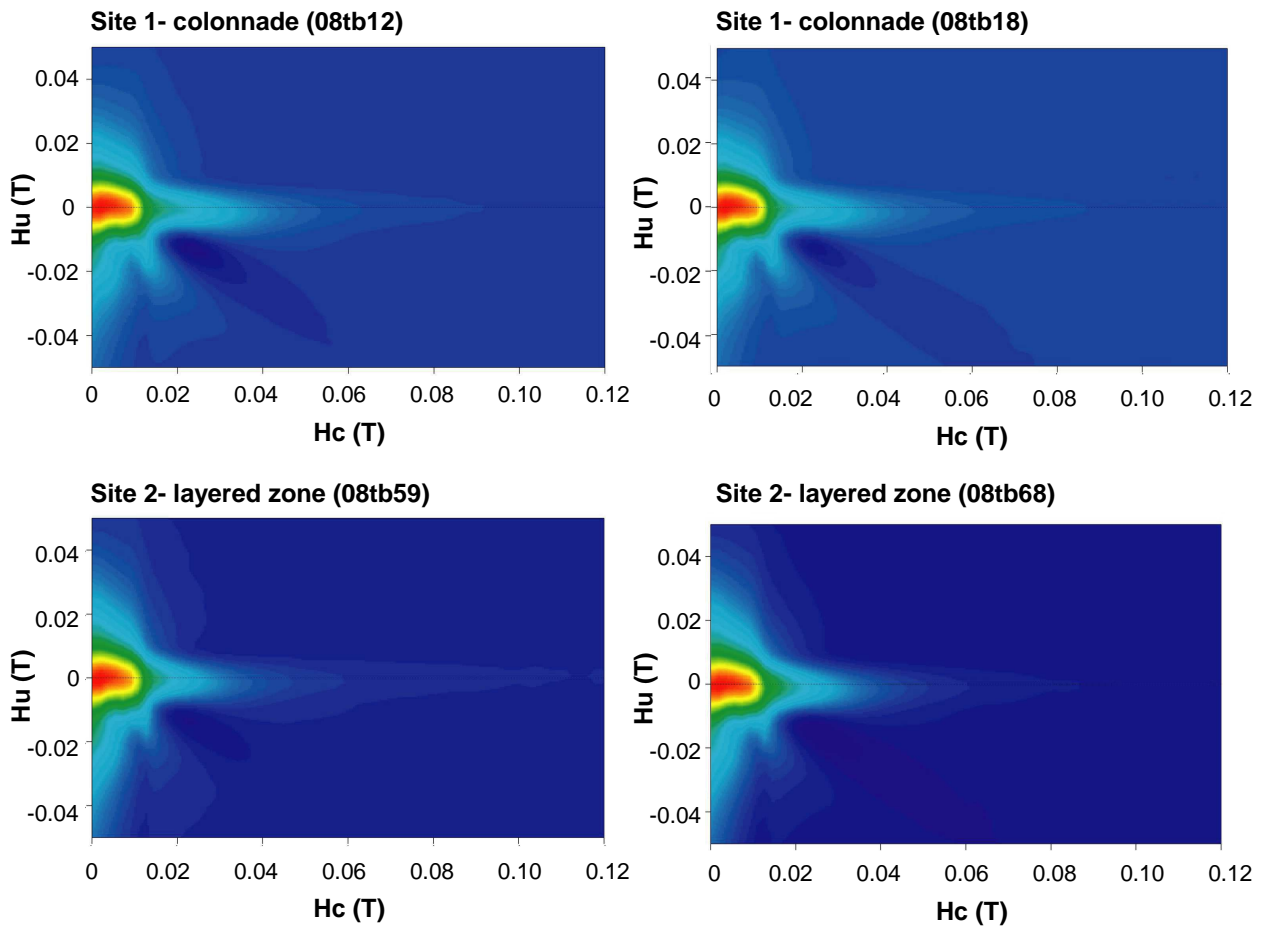


Figure 4- 6 : FORCs diagrams from site 1 colonnade (samples 08tb12 and 08tb18) and from site 2 layered zone (samples 08tb59 and 08tb68). These diagrams are characteristic of pseudo-single domain grains.

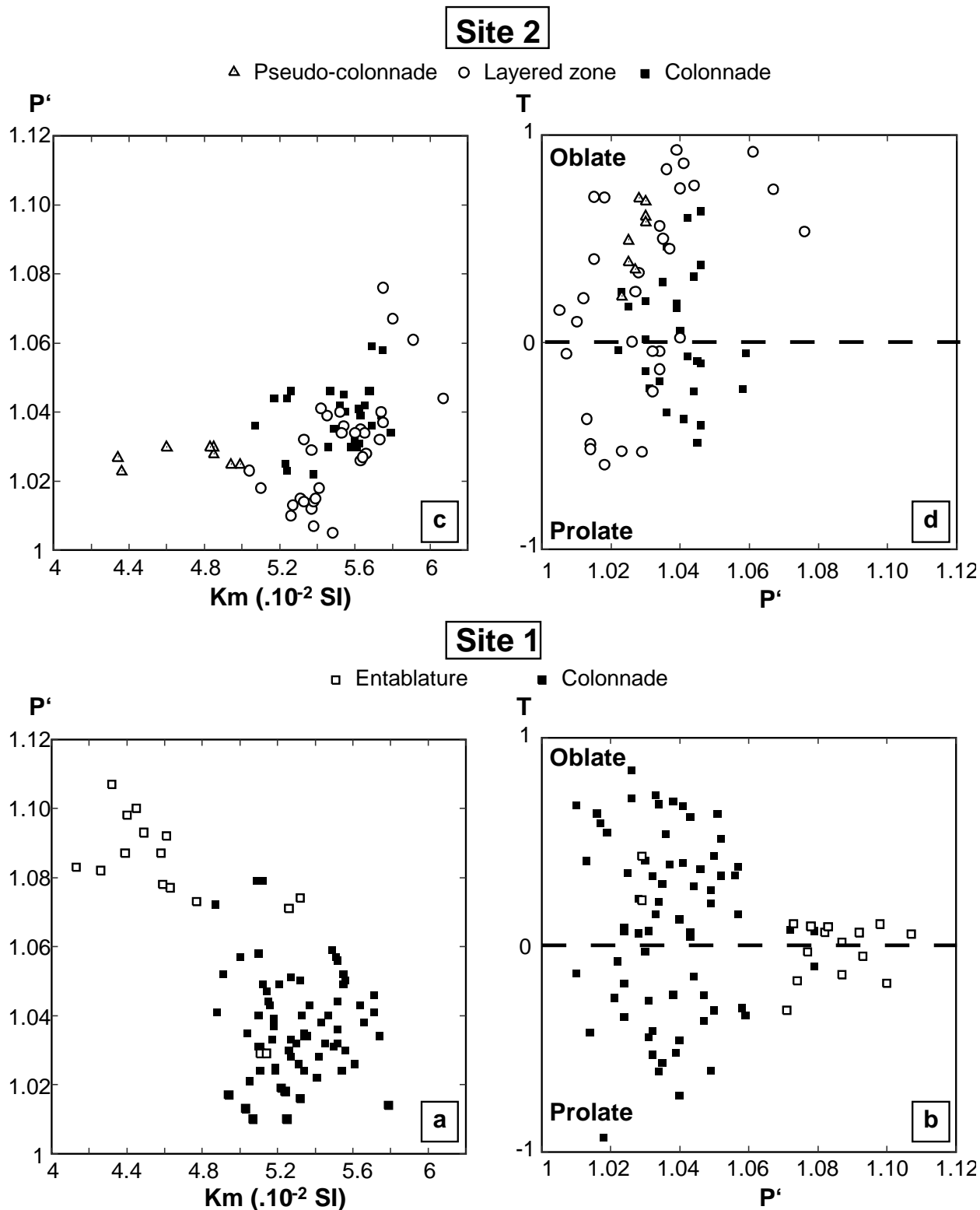


Figure 4- 7 : Diagrams representing the anisotropy parameter  $P'$  versus the bulk magnetic susceptibility  $km$  for the different levels of site 1 (a) and site 2 (c). Diagrams of  $P'$  versus the shape parameter  $T$  are shown in (b) and (d) for site 1 and site 2, respectively.

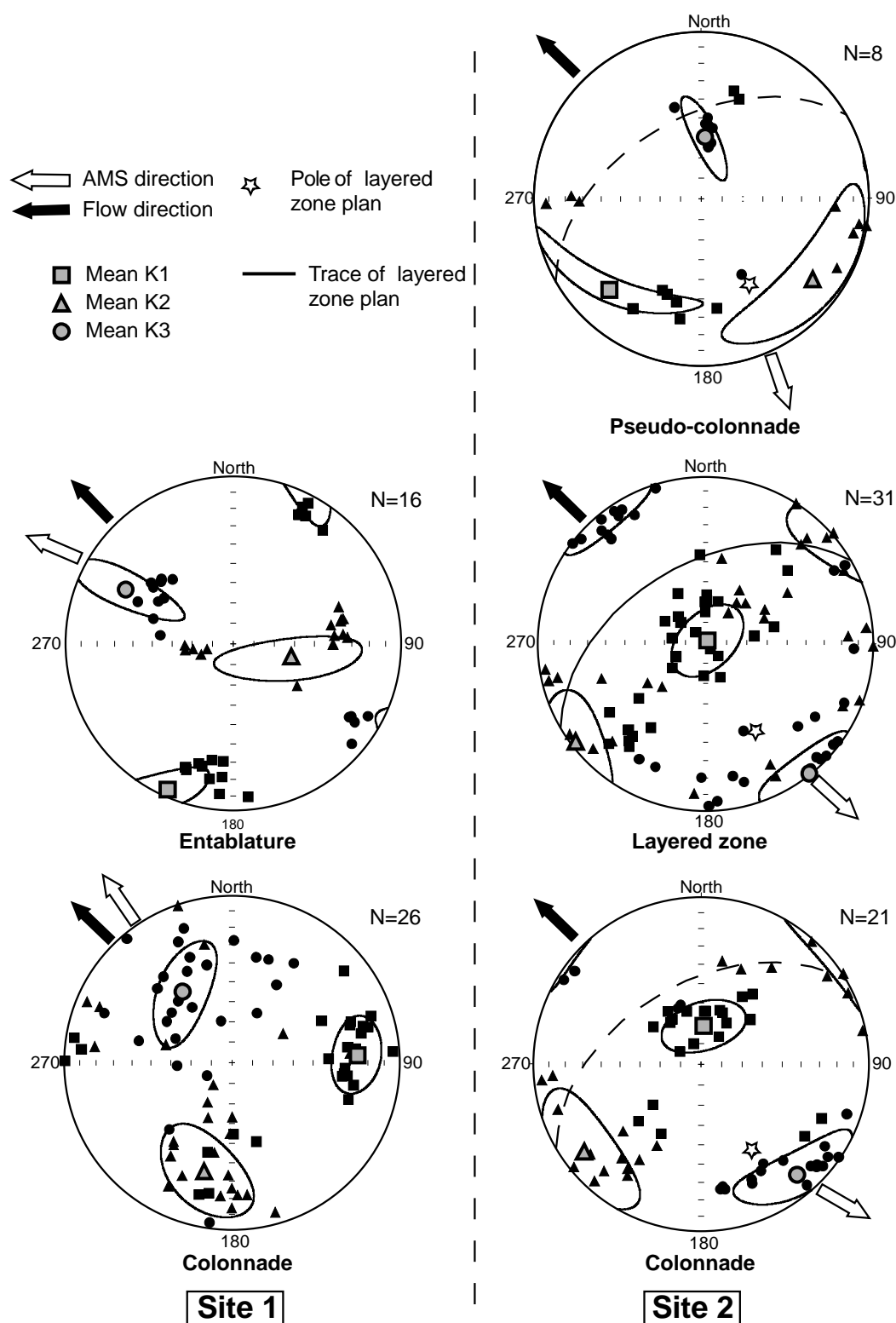


Figure 4- 8 : Equal area projection in the lower hemisphere of the principal magnetic susceptibilities axes (K1, K2, K3) measured in specimens from the different levels of the La Palisse flow for sites 1 and 2. The flow direction inferred from field observations is shown by the black arrow and the flow direction determined from AMS study is shown by the white arrow. The confidence ellipses are computed from Jelinek's statistics (Jelinek, 1978). N = number of measurements. For site 2, the layered flow plane is also presented in full line for layered zone and in dashed line for colonnade and pseudo-colonnade.

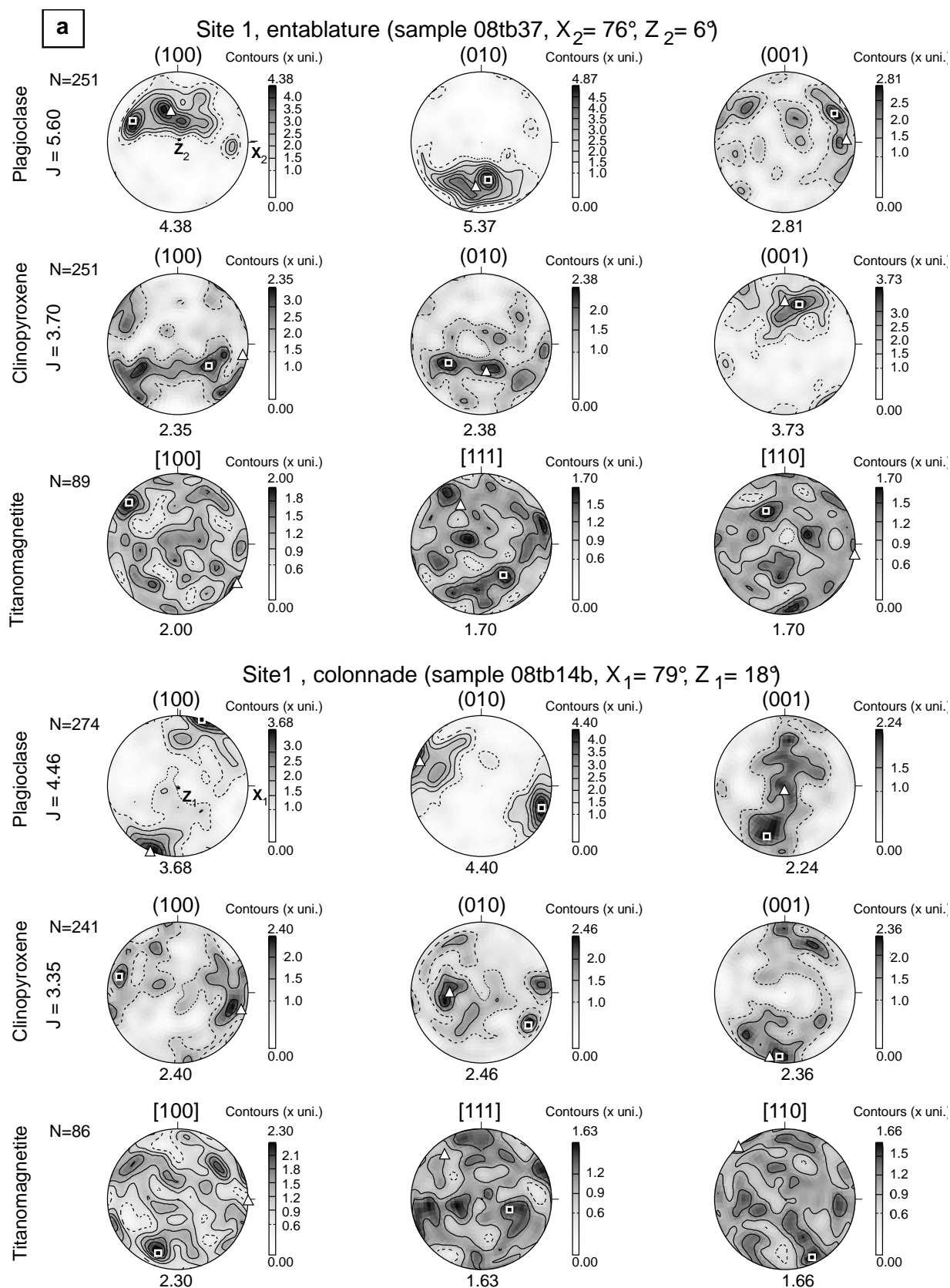
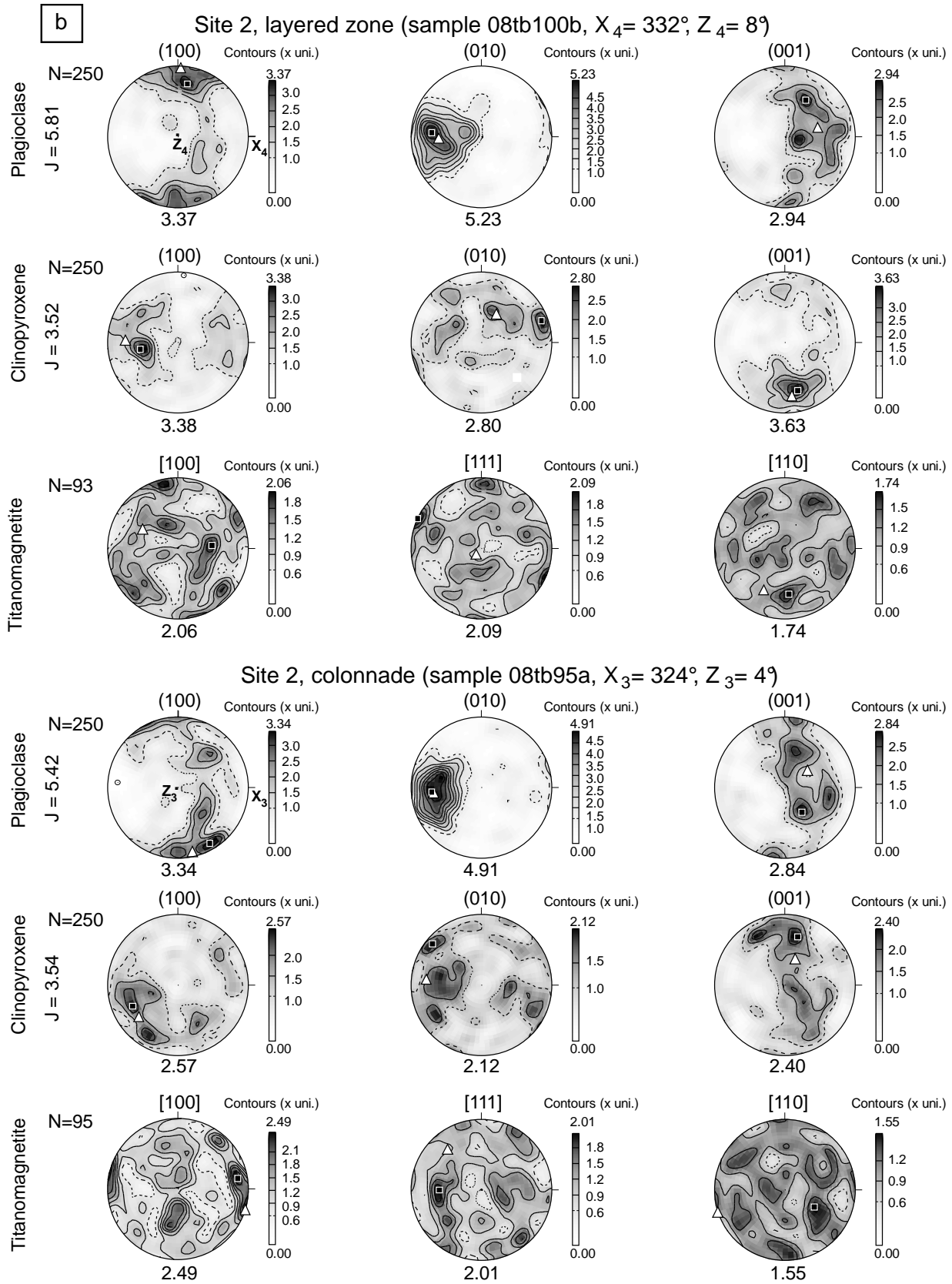
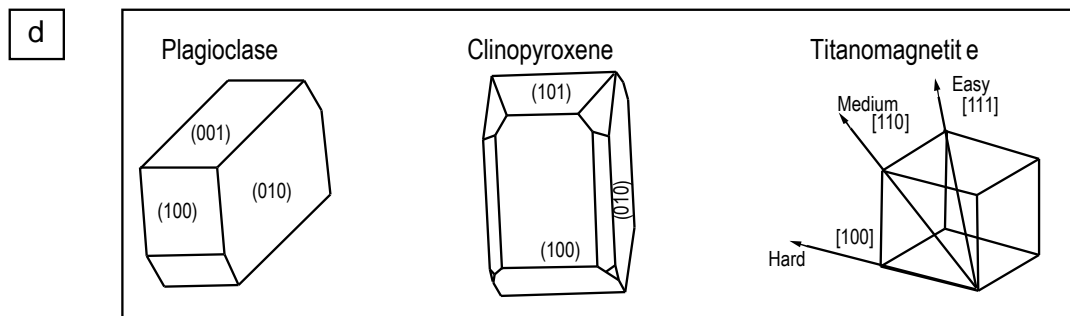
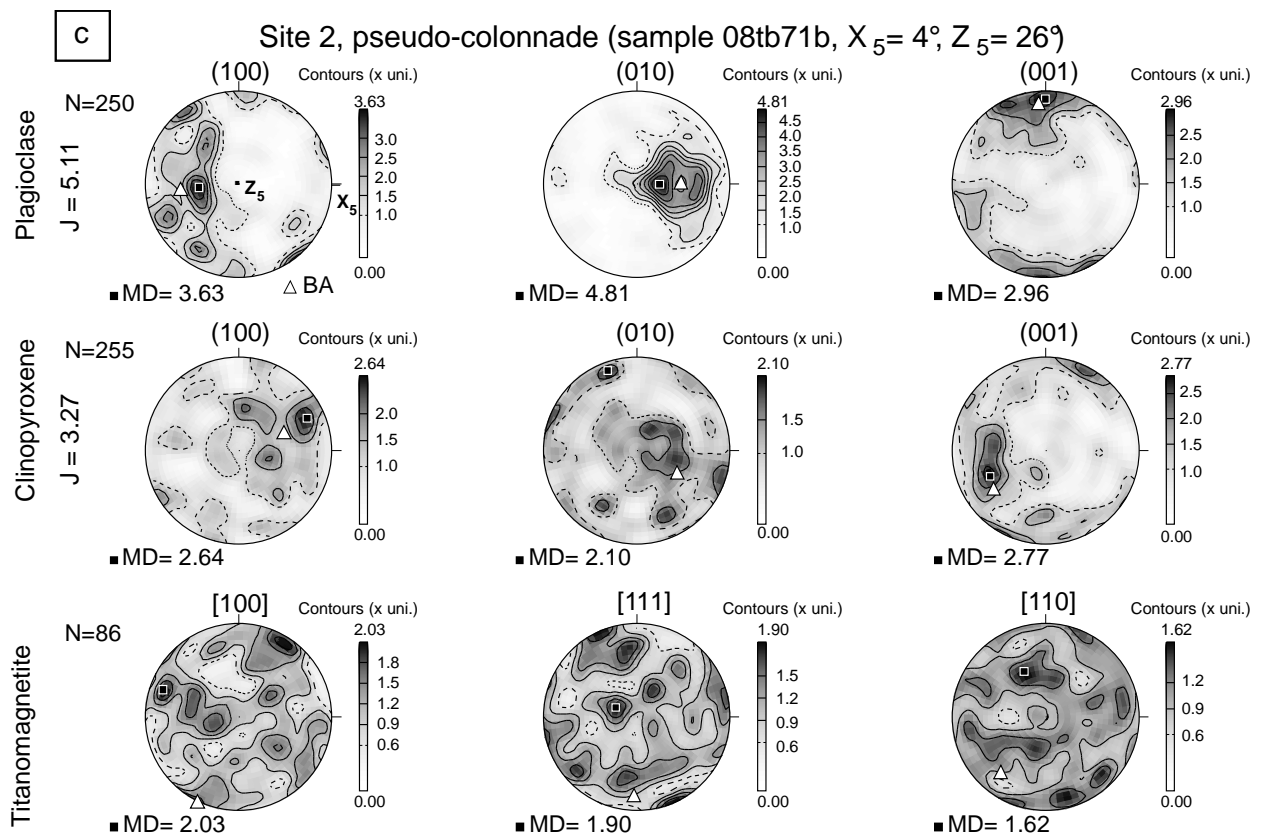


Figure 4- 9 : Lattice Preferred Orientation (LPO) of plagioclase, clinopyroxene and titanomagnetite of samples from the different levels of the La Palisse flow: (a) from the colonnade and the entablature of site 1, (b) from the colonnade and the layered zone of site 2 and (c) from the pseudo-colonnade of site 2. Equal area, lower hemisphere projection in the specimen coordinates system with the field measured sample angles X (the azimuth) and Z (the plunge). Contours are in Multiples of Uniform



Distribution (MUD). MD is the maximum of density, BA is the Best Axis, J is the texture index and N the number of measurements. (d) Representative habitus of plagioclase, clinopyroxene and titanomagnetite single crystals.





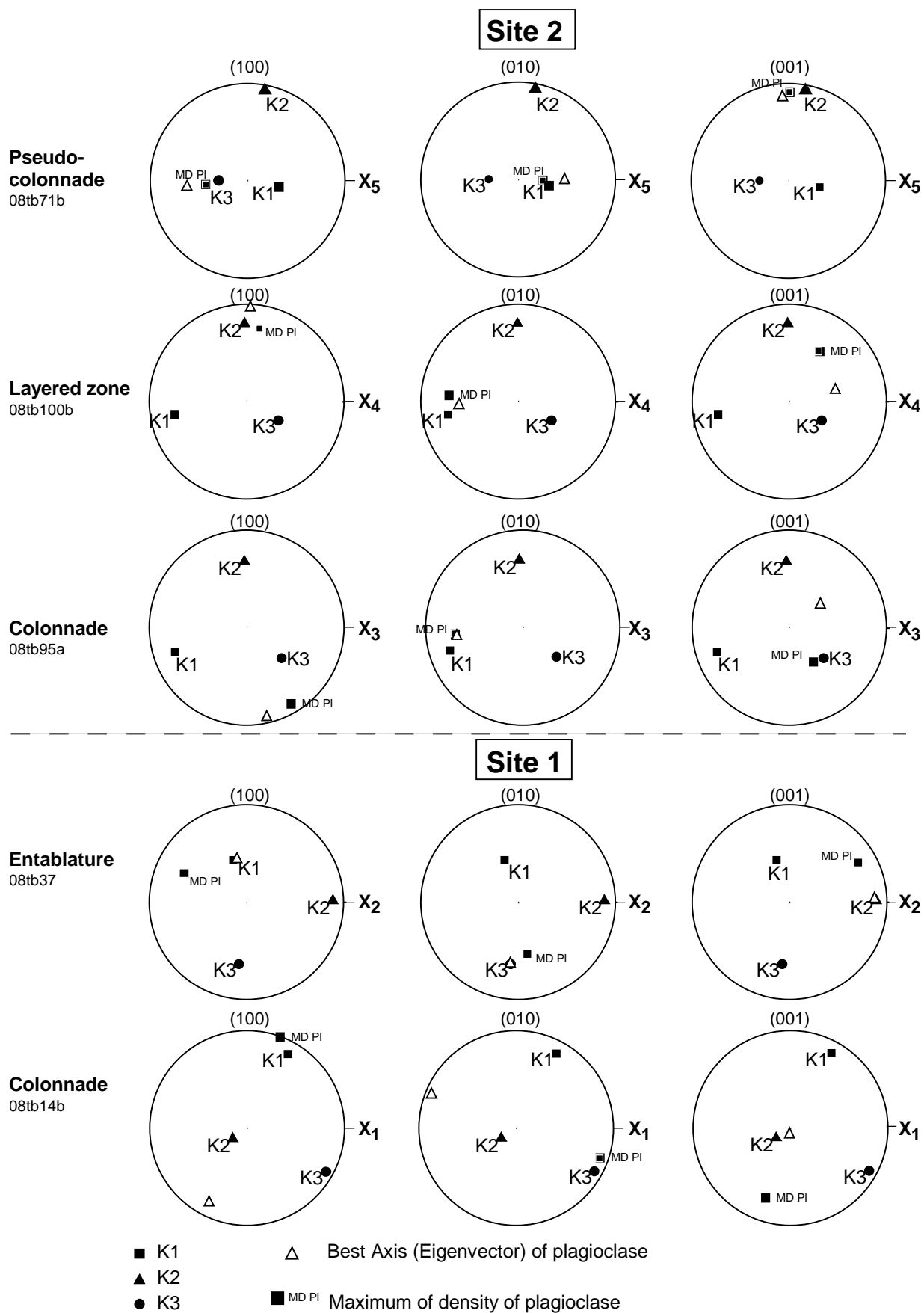
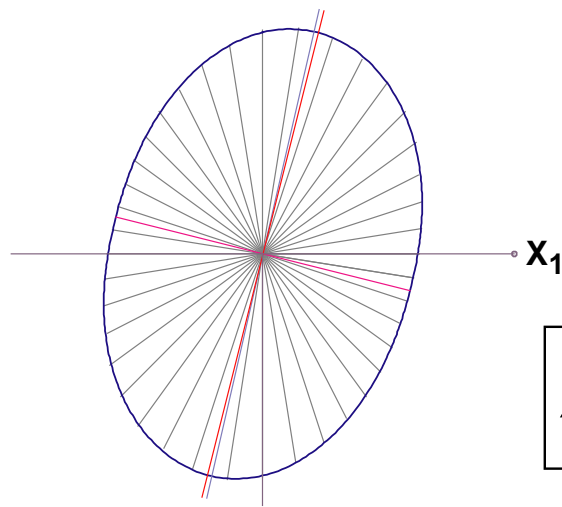
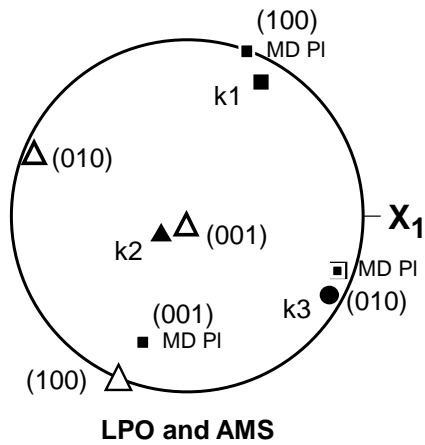


Figure 4- 10 : Projection in the specimen referential (as Figure 9) of maximum of density (MD) and "Best Axis" (eigenvector) of plagioclase LPO for samples from the different flow levels. Density maximum of [111]-axes of titanomagnetite and mean eigenvectors  $K_1$ ,  $K_2$  and  $K_3$  are plotted.

a

Colonnade site 1, 08tb14b



b

Pseudo-colonnade site 2, 08tb70b

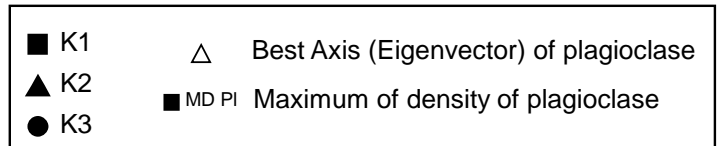
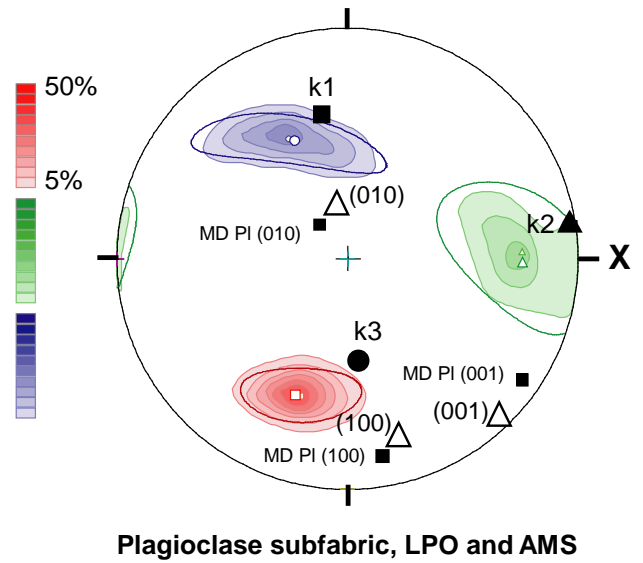


Figure 4- 11 : Projection of plagioclase LPO (maximum of density (MD) and "Best Axis") and AMS fabrics (a) and Shape Preferred Orientation of plagioclase from rose of direction representation computed using the intercepts method of Launeau (Launeau and Robin, 1996) from digitized thin section images (b) for sample 08tb14b (site 1, colonnade). Stereograms and roses of direction are in the specimen referential.

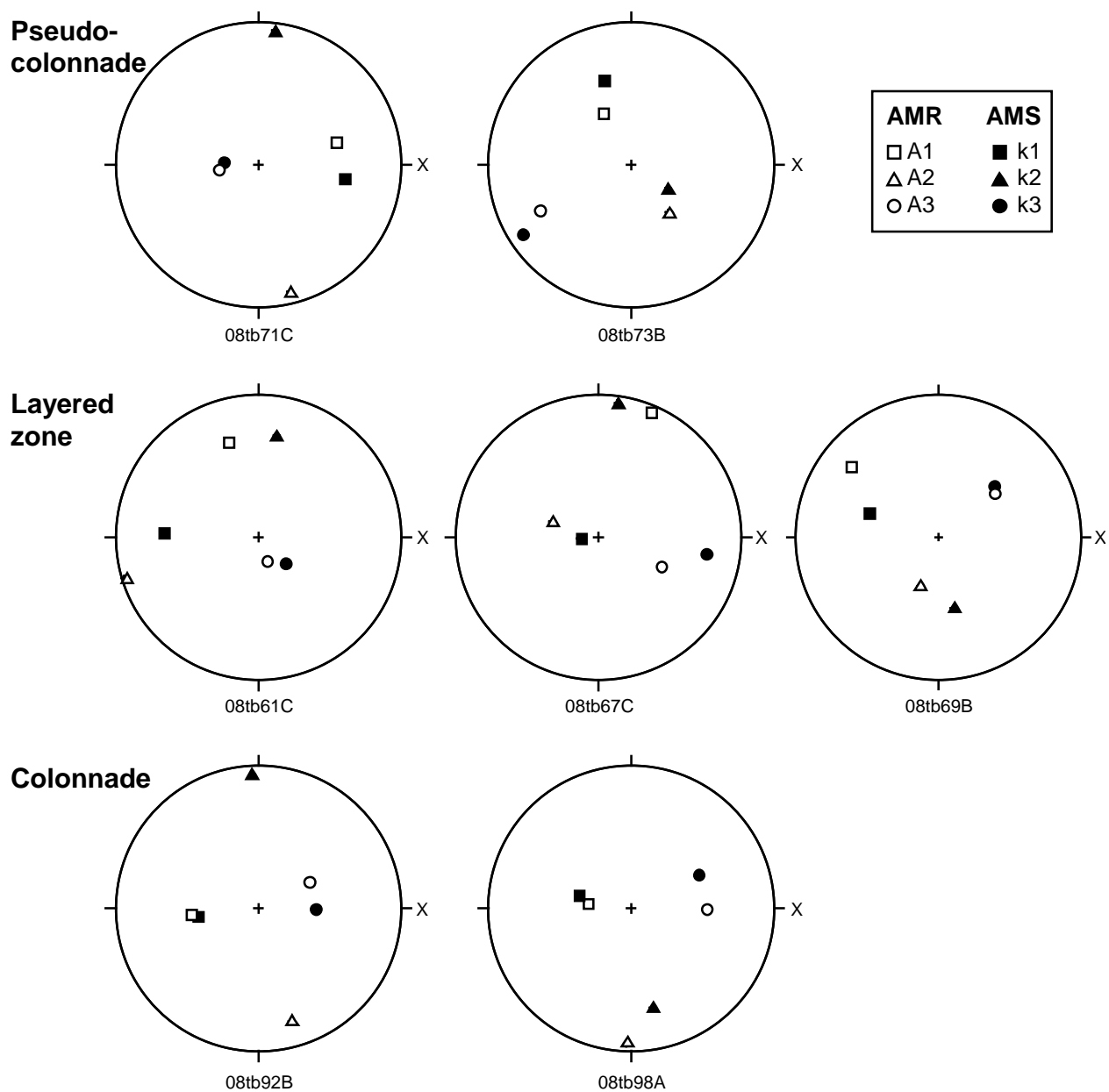


Figure 4- 12 : Principal directions of the AMS and AMR fabrics for samples from layered zone and colonnade of the site 2 flow in the equal-area, lower-hemisphere projections in geographic coordinate system. The black and white symbols are AMS and AMR principal directions, respectively.





## Chapitre 5. Études pétrographiques, texturales, géochimiques et structurales à l'échelle du prisme

# Introduction

Afin d'appréhender au mieux la formation de prismes dans les coulées de lave, nous avons également mené des études pétrographiques, géochimiques et pétrophysiques à l'échelle du prisme. Les analyses ont été réalisées sur des prismes de la colonnade des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier, car les prismes peuvent y être clairement distingués et isolés à la différence de l'entablement. La coulée de Saint-Arcons-d'Allier a par ailleurs une colonnade particulièrement bien développée qui permet d'une part l'étude de sections transversales de prismes, comme pour La Palisse, mais également l'étude de sections longitudinales, i.e. de la base d'une colonne vers le sommet. La première partie de ce chapitre présente les études pétrologiques et géochimiques et la seconde partie est axée sur les études pétrophysiques à l'échelle du prisme.

## Partie I : Études Pétrologiques et Géochimiques

### 1. Variation pétrographique

#### 1.1. Prismes de la coulée de La Palisse

Des carottages sur une section de prisme de la coulée de La Palisse (site 1) ont été effectués du bord vers le centre du prisme (*Figure 5- 1*). Ces carottes ont été découpées en spécimens pour la mesure de l'anisotropie de susceptibilité magnétique puis utilisées pour la confection de lames minces. Enfin, des poudres fines ont été réalisées pour les analyses de composition chimique des éléments majeurs, traces, terres rares et isotopiques. Deux échantillons, 07tb02 et 07tb05 (n° 2 et 5 sur la figure 1), ont été sélectionnés pour comparer la pétrographie du bord et du centre du prisme (*Figure 5- 2*). Nous constatons que les compositions modales, obtenues par analyse d'image (cf chapitre 3) entre le bord du prisme (07tb02) et le centre (07tb05) sont comparables, avec une proportion de 19 % de phénocristaux d'olivine et clinopyroxène, environ 1% de microphénocristaux de plagioclase, et 80 % de mésostase contenant des microlites de magnétite (2 à 3 %), de plagioclase et de clinopyroxène ainsi que du verre.

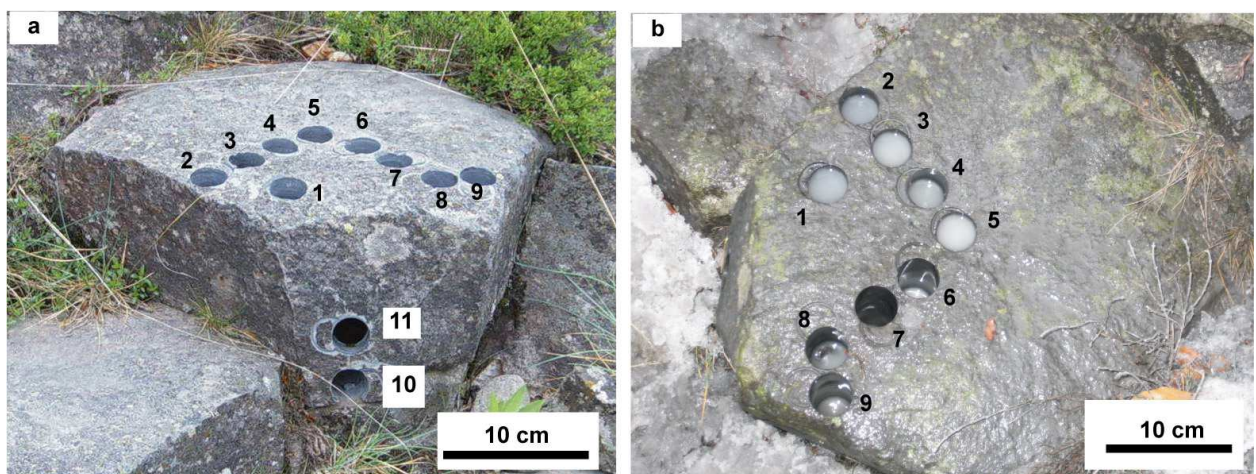


Figure 5- 1 : Prisme issu de la colonnade de la coulée de La Palisse (site 1) (a) vue de côté et (b) vue de dessus, avec les carottages des bords du prisme vers le centre. Les numéros des échantillons sont indiqués.

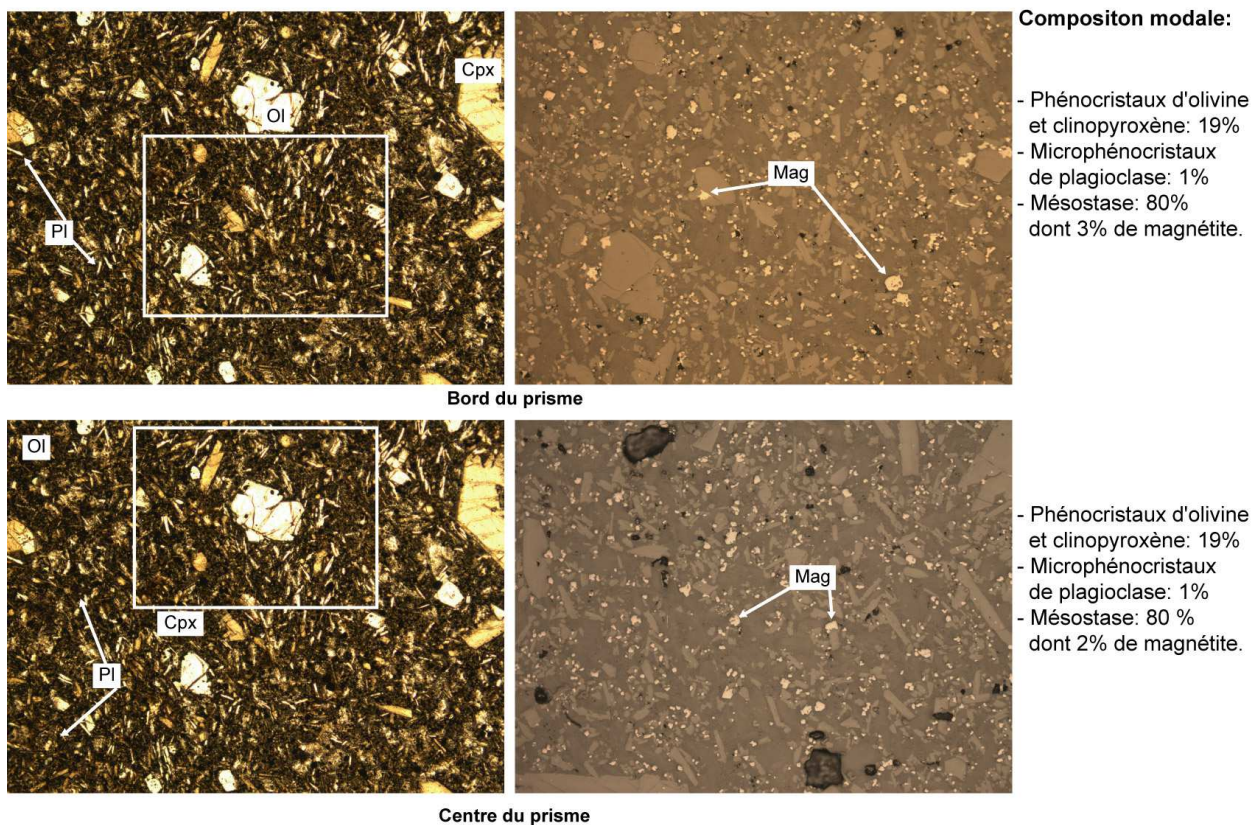


Figure 5- 2 : Microphotographies d'échantillons du bord et du centre du prisme, au microscope optique en lumière polarisée non analysée à gauche et en lumière réfléchie à droite. Les encadrés blancs de la photo de gauche correspondent à la zone photographiée en lumière réfléchie.

## 1.2. Prismes de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier

La coulée de Saint-Arcons-d'Allier permet d'accéder aisément à des sections de prismes. En effet, les prismes sont nombreux et déjà accessibles dans la carrière, contrairement à ceux de La Palisse qu'il faut désolidariser du reste de l'affleurement. D'autre part, ceux-ci sont de plus petite taille, ce qui permet d'en prélever plusieurs et de les manipuler plus facilement pour les études. Les prismes STA-F, STA-B et STA-G (*Figure 5- 3a, c et d*) ne sont pas en place contrairement au prisme de La Palisse (*figure 5-1b*), mais restent intéressants pour l'étude du prisme en lui-même. Les prismes STA-B et STA-G présentent plusieurs zonations qui suivent plus ou moins les bords du prisme. Le prisme STA-B (*figure 5-3c*) est utilisé pour l'étude pétrographique (présentée ci-dessous) des échantillons prélevés au niveau des zonations et au centre du prisme. Des prélèvements sont effectués avec une fraise de dentiste sur le prisme STA-G (*figure 5-3d*) pour les analyses isotopiques.



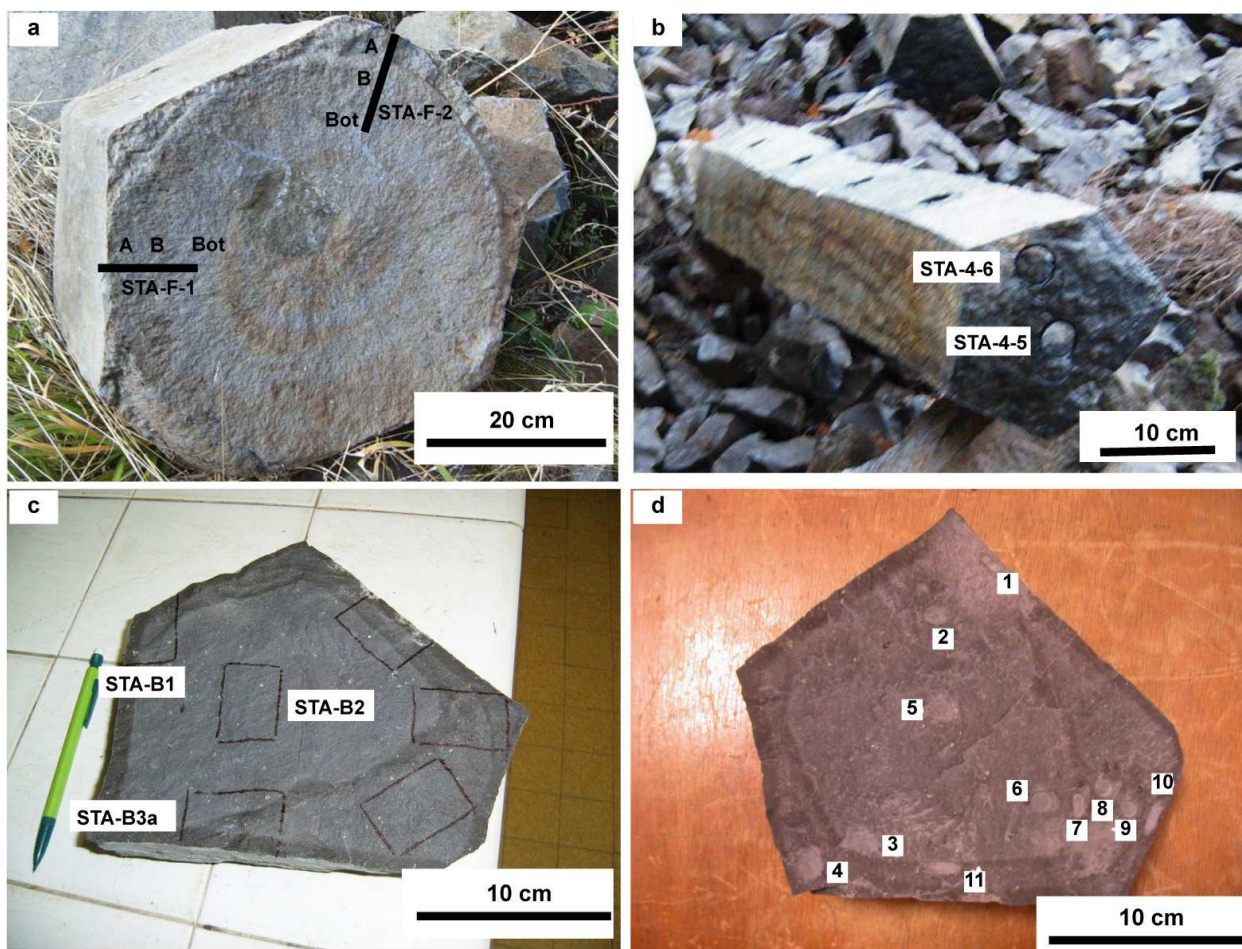


Figure 5- 3 : Photos des sections de prismes issus de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier. (a) Prisme STA-F avec les carottages STA-F1 et STA-F2 indiqués, A et B correspondant aux spécimens découpés des carottes avec A au bord du prisme et B vers le centre. (b) Carottages STA-4-5 et STA-4-6 effectués à la base du prisme, dans la section transversale. (c) Section de prisme STA-B issus de la carrière de Saint Arcons d'Allier ; la position des lames minces STA-B3a et STA-B2 est indiquée. (d) Section de prisme STA-G issus de la carrière de Saint Arcons d'Allier avec la localisation des échantillons prélevés pour l'analyse des rapports isotopiques de l'hydrogène (numéros de 1 à 10).

Les proportions de phénocristaux d'olivine et de clinopyroxène ainsi que de microphénocristaux de plagioclase sont semblables entre les échantillons du bord et ceux du centre du prisme STA-B avec une mésostase contenant 3 % de titanomagnétites (*Figure 5- 4*). La seule différence notable entre les échantillons STA-B3A et STA-B2 est la présence, dans l'échantillon issu du bord du prisme, de phases brunes localisées dans la mésostase et de grains bruns entourés d'un liseré noir. La phase brune correspond à l'altération du verre sous forme de produit silico-alumineux comme décrit par Dekayir et El-Maataoui (2001) dans les basaltes alcalins de l'Atlas marocain, et le grain brun à un minéral oxyhydroxydes de fer de type goethite (minéral secondaire issu de l'altération de l'olivine) comme observé par Moinereau (1977) sur des basaltes du Velay. Nous notons que ces minéraux, observés dans l'échantillon issu du bord du prisme (STA-B3A), sont absents dans l'échantillon STA-B2 situé au centre du prisme. Toutefois, ces minéraux sont rarement observés dans les échantillons et les études de la minéralogie magnétique présentées dans la deuxième partie de ce chapitre ne mettent pas en évidence d'autres minéraux riches en fer que la titanomagnétite.



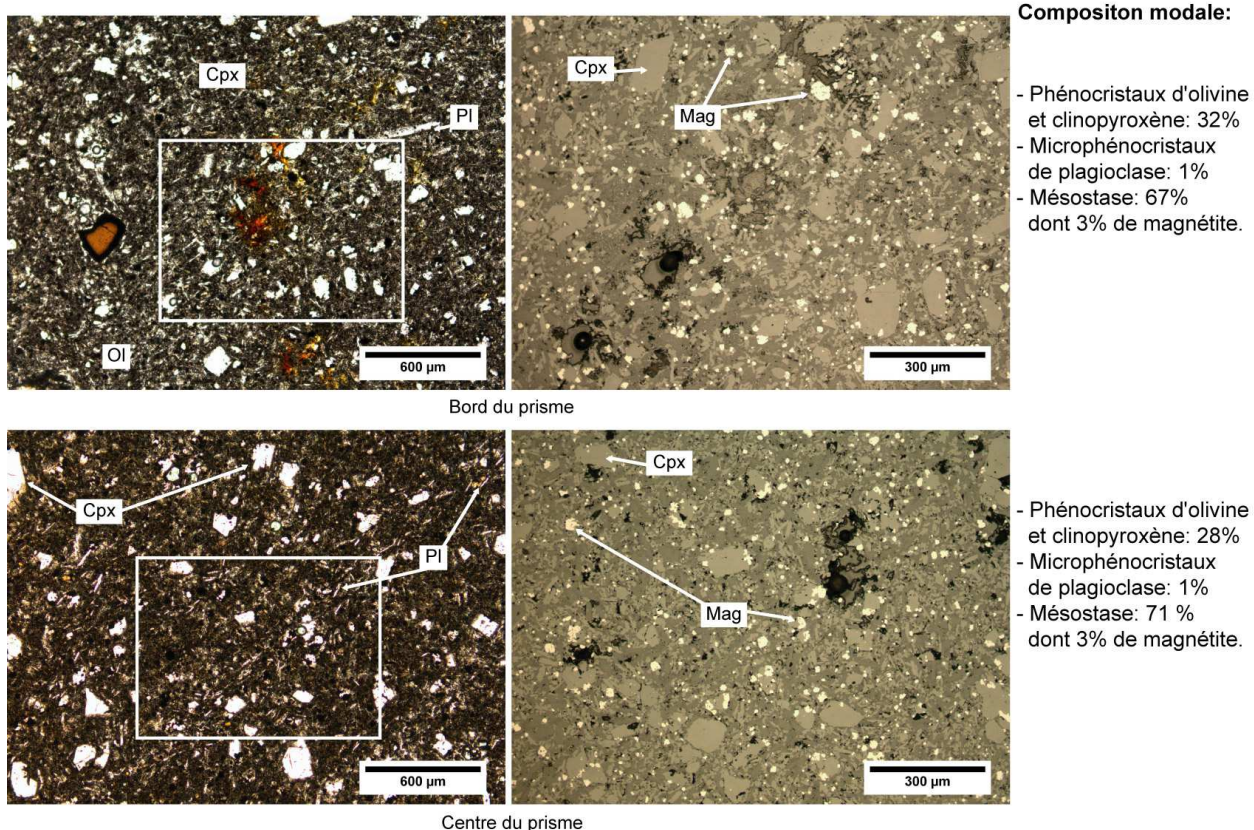


Figure 5- 4 : Photos des lames minces STA-B3a (bord du prisme) et STA-B2 (centre du prisme) au microscope optique en lumière polarisée non analysée (à gauche) et en lumière réfléchie (à droite), issues du prisme STA-B provenant de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier.

Le prisme STA-B présente 2 zonations qui sont contenues dans la lame mince STA-B3a (Figure 5-3c). Ces zonations ne se retrouvent pas lors de l'observation de cette lame mince au microscope optique. Seules les lames épaisses (environ 100 µm d'épaisseur) permettent de retrouver ces zonations. A partir de l'observation sur lame épaisse, 3 zones apparaissent au niveau de STA-B1 (Figure 5- 5). L'analyse en lumière réfléchie montre que la proportion de titanomagnétite est comparable pour les 3 zones, de 4% pour la zone 1 et de 3 % pour la zone 2 et 3, avec une taille moyenne des grains semblable (environ 7 µm) dans les trois zones (Figure 5- 5). Les zones 1 et 3 correspondent aux zonations qui présentent plus d'arrachement à la surface des lames (plages de couleur plus sombre) que la zone 2 qui est la zone intermédiaire. Cette dernière zone semble moins fragile que les zones 1 et 3 présentant moins d'arrachement lors de la confection de la lame mince.

Les zones « claires » et « sombres » observées dans les prismes de Saint-Arcons-d'Allier (Figure 5-3c) ont été analysées par microspectrométrie Raman (collaboration avec Jacques Bois à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne), mais cette méthode analytique ne permet pas de caractériser des paramètres vraiment distinctifs de ces zones « claires » et zones « sombres » des prismes de Saint-Arcons-d'Allier. Les zones « sombres » semblent contenir plus de micro-vésicules que les zones « claires », suggérant une vésiculation (nucléation et croissance de bulles) plus important dans les zones « sombres » que dans les zones « claires ».

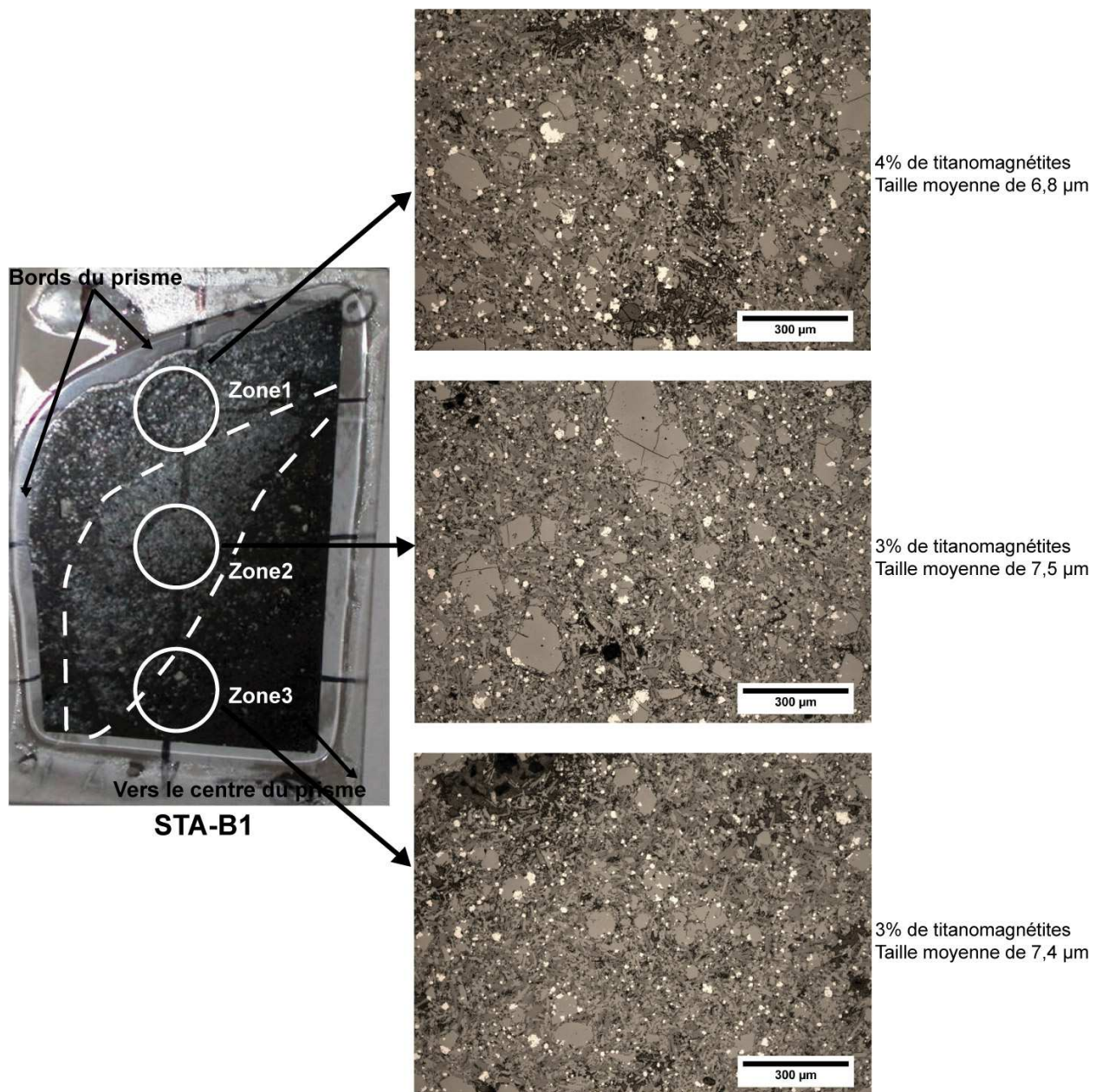


Figure 5- 5 : Photo de la lame STA-B1 avec la représentation des trois zonations correspondant aux zones 1, 2 et 3 (numérotation du bord au centre du prisme) et microphotographies en lumière réfléchie à plus fort grossissement de chacune de ces zones.

## 2. Analyse texturale à l'échelle du prisme (La Palisse)

L'orientation préférentielle de réseau du plagioclase, du clinopyroxène et de la titanomagnétite est mesurée par EBSD pour les échantillons 07tb02 et 07tb05 issus du bord et du centre d'un prisme de la coulée de La Palisse (*Figure 5-1*). Les figures de pôle des deux échantillons étudiés sont présentées *Figure 5-6* avec pour référentiel le nord géographique.

Les cristaux de plagioclase et en particulier leur plan (010) présentent les concentrations (maximum de densité MD) les plus élevées par rapport aux autres minéraux, avec des valeurs  $MD_{(010)} = 5,06$  pour 07tb02 et  $MD_{(010)} = 4,49$  pour 07tb05. Pour chaque échantillon, le plan (100) du plagioclase tend à être parallèle au plan (001) du clinopyroxène, et le plan (010) du plagioclase tend à



être parallèle au plan (100) du clinopyroxène. La titanomagnétite ne présente pas d'orientation préférentielle (*Figure 5-6*).

La différence entre les deux échantillons réside dans les forces de fabrique ( $J_{\text{index}}$ ) du plagioclase et du pyroxène qui sont légèrement plus élevées en bordure (07tb02) qu'au centre (07tb05). Pour le plagioclase,  $J_{\text{index}}$  bordure = 5,2 et  $J_{\text{index}}$  centre = 4,2. Pour le pyroxène  $J_{\text{index}}$  bordure = 3,6 et  $J_{\text{index}}$  centre = 3,2. Ces résultats indiquent une meilleure organisation (fabrique cristallographique) de la trame silicatée constituée par le plagioclase et le clinopyroxène en bordure qu'au centre.

De plus, nous pouvons constater que les maxima de densité du plagioclase et du clinopyroxène des échantillons 07TB02 et 07TB05 présentent la même orientation par rapport au nord géographique. La formation du prisme ne paraît donc pas perturber de manière significative l'orientation des minéraux imposée par l'écoulement de la lave.

### 3. Profils de composition chimique à l'échelle du prisme (majeurs, traces, REE et isotopes, composition des minéraux)

Les données de composition chimique en éléments majeurs et traces sont obtenues par fluorescence de rayons X sur des perles lourdes (cf chapitre 3). Les échantillons sont présentés *Figure 5- 1* pour la coulée de La Palisse, et *Figure 5- 3a* pour la coulée de Saint-Arcons-d'Allier. Pour l'orgue STA-F (Saint-Arcons-d'Allier), deux carottages ont été réalisés : les carottes STA-F1 et STA-F2 avec les spécimens A situés aux bords du prisme et les spécimens B vers le centre, le spécimen Bot correspond au bas de la carotte situé encore plus près du centre du prisme.

Les analyses sont détaillées en *Annexe II* ainsi que la déviation par rapport au standard.

#### 3.1. Variations des éléments majeurs sur roche totale

Les éléments majeurs  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{P}_2\text{O}_5$  sont présentés dans des diagrammes en fonction du  $\text{MgO}$  (*Figure 5- 7*). Les échantillons prélevés du bord vers le centre des prismes de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier sont distingués afin de voir s'il existe une distribution de ces éléments en fonction de l'emplacement des échantillons dans le prisme. Les échantillons du prisme de La Palisse n°1, 2, 9, 10 et 11 sont positionnés au bord du prisme, l'échantillon n°5 est au centre et les autres échantillons sont en position intermédiaire (*Figure 5-1*).

Pour le prisme de La Palisse,  $\text{MgO}$  est l'un des éléments qui varient le plus parmi les éléments majeurs, (8,8 à 9,1  $\pm$  0,1 %), les teneurs en  $\text{MgO}$  varient de 8,9 à 9,1 % pour les échantillons du bord du prisme et de 8,8 à 9 % pour les échantillons intermédiaires et du centre du prisme.

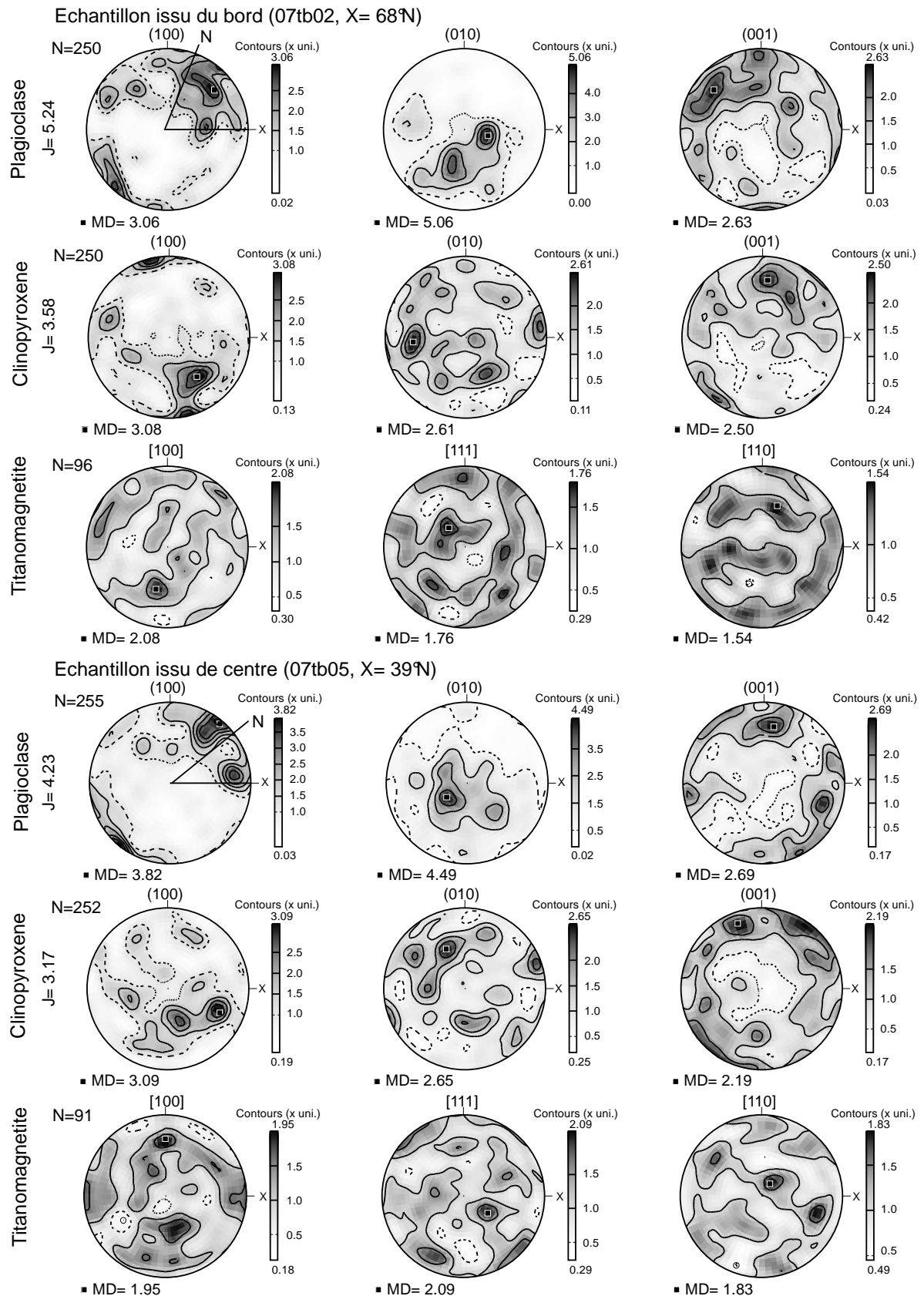


Figure 5- 6 : Orientations préférentielles de réseau obtenues par EBSD du plagioclase, du clinopyroxène et de la titanomagnétite des échantillons 07tb02 et 07tb05, respectivement issus du bord et du centre d'un prisme de la coulée de La Palisse. Projections dans l'hémisphère inférieur et en aires égales. N est le nombre de mesures et J indique la force de fabrique. Des rotations aux OPR ont été effectuées afin de présenter les figures de pole avec comme référentiel le nord géographique (N) pour les deux échantillons.

Ces gammes de variation sont donc comparables entre elles. Le  $\text{SiO}_2$  varie quant à lui de 45,7 à  $46 \pm 0,4 \%$ , la valeur la plus faible correspondant à l'échantillon 08TB05 situé au centre du prisme. Cependant, le diagramme  $\text{SiO}_2$  vs  $\text{MgO}$  ne montre pas de distribution particulière de  $\text{MgO}$  ou  $\text{SiO}_2$  en fonction de leur emplacement dans le prisme.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  varie de 13,9 à 14,1 %, les teneurs ne semblant pas varier en fonction de l'emplacement des échantillons (*Figure 5-7*). Les éléments  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{P}_2\text{O}_5$  présentent des gammes de variation plus faibles :  $2,36 < \text{TiO}_2 \% < 2,38 \pm 0,02 \%$  ;  $1,9 < \text{K}_2\text{O} \% < 2,1 \pm 0,04 \%$  et  $0,8 < \text{P}_2\text{O}_5 \% < 0,9 \pm 0,007 \%$ . Le diagramme  $\text{TiO}_2$  vs  $\text{MgO}$  ne montre pas de distribution particulière des échantillons, et ce d'autant plus que la gamme de variation correspond à la déviation par rapport au standard (*Annexe II*). En revanche, les diagrammes  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{P}_2\text{O}_5$  montrent des comportements légèrement différents entre les échantillons du bord du prisme, et ceux situés en position intermédiaire et centrale. Les teneurs en  $\text{K}_2\text{O}$  varient ainsi de 1,97 à 2,05 % pour les échantillons du bord du prisme et de 2,04 à 2,05 % pour les échantillons intermédiaires et du centre. Les teneurs en  $\text{K}_2\text{O}$  sont donc plus faibles au bord du prisme par rapport au centre. Enfin, les teneurs en  $\text{P}_2\text{O}_5$ , montrent également de légères différences de teneurs entre les échantillons du bord du prisme avec des variations de  $0,85 \text{ à } 0,90 \pm 0,007 \%$  et des variations de 0,84 à 0,86 pour les échantillons situés vers le centre du prisme. La *Figure 5- 7* montre bien une concentration plus élevée en  $\text{P}_2\text{O}_5$  pour l'échantillon 9 situé au bord mais les teneurs des échantillons 1 et 2 également situés au bord du prisme sont équivalentes aux échantillons 5 et 6 au centre du prisme. Les teneurs en  $\text{P}_2\text{O}_5$  ne semblent pas vraiment varier en fonction de l'emplacement de l'échantillon dans le prisme.

Pour le prisme STA-F de Saint-Arcons-d'Allier, les diagrammes de la *figure 5-7* permettent de mieux distinguer les échantillons du bord du prisme de ceux situés vers le centre. Les teneurs en  $\text{MgO}$  varient de 9,4 à  $9,8 \pm 0,1 \%$  avec une gamme de variations de 9,4 à 9,6 % pour les échantillons du bord du prisme et de 9,6 à 9,8 % pour ceux du centre. Les teneurs en  $\text{SiO}_2$  varient de 44,9 à  $45,3 \pm 0,4 \%$ . Cette gamme de variation correspondant à l'erreur analytique, ne nous permettant pas de distinguer des variations mesurables en  $\text{SiO}_2$ . Les autres éléments majeurs ne semblent pas varier en fonction de l'emplacement des échantillons dans le prisme. Les  $[\text{Mg}]$  étant de 63 pour tous les échantillons (*Annexe II*), ils ne permettent pas de proposer une discussion sur le degré de différenciation qui pourrait être moindre pour les échantillons du centre (teneurs en  $\text{MgO}$  plus élevées) que pour les échantillons du bord du prisme.

Au final, seuls les éléments  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{P}_2\text{O}_5$  montrent des variations significatives selon l'emplacement des échantillons dans le prisme de La Palisse, tandis que seul  $\text{MgO}$  semble varier pour le prisme STA-F de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier. Les concentrations des autres éléments majeurs n'apportent pas de nouveaux arguments.

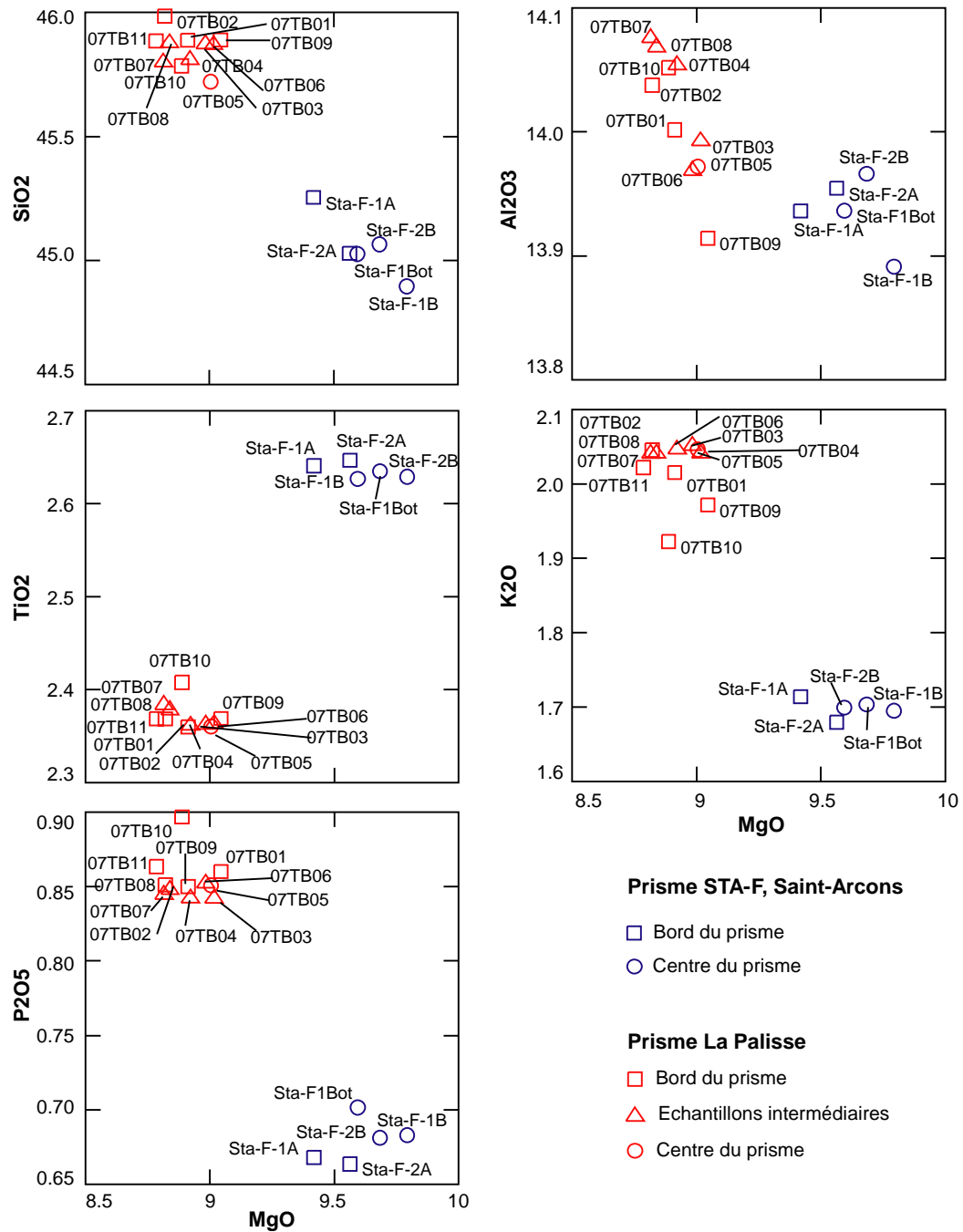


Figure 5- 7 : Diagrammes des éléments majeurs en poids % en fonction de MgO poids % des échantillons issus du bord vers le centre du prisme de la coulée de La Palisse (en rouge) ; et du bord et du centre du prisme STA-F de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier (bleu).

## 3.2. Variation en éléments traces et terres rares sur roche totale

### 3.2.1. Variations des éléments en traces

Les teneurs des éléments en traces Ni, Sr et Ba (exprimées en ppm) ainsi que le rapport Ti/V sont présentés en fonction de MgO (poids %) sur la *Figure 5- 8*.

Pour le prisme de La Palisse, les teneurs en Ni varient de 165 à  $267 \pm 5$  ppm, avec des gammes de variations de 171 à 192 ppm pour les échantillons du bord du prisme et de 182 à 268 ppm pour les échantillons situés vers le centre du prisme. Une corrélation positive est observée entre la teneur en Ni et la teneur en MgO (*Figure 5- 8a*). Le Sr varie de 950 à 969 ppm  $\pm 6$  ppm, avec des gammes de variations de 950 à 967 ppm pour les échantillons du bord du prisme et de 959 à 969 ppm pour les échantillons situés vers le centre du prisme. Cependant, seul un échantillon du bord (08TB09) présente une teneur faible de 950 ppm. En dehors de ce point, les gammes de variation sont ainsi comparables entre les échantillons du bord et du centre du prisme (*Figure 5- 8b*). Le Ba varie de 758 à  $793 \pm 10$  ppm, les gammes de variation étant semblables pour les échantillons du bord et du centre du prisme (*Figure 5- 8c*). Les rapports Ti/V varient de 114 à 116 ppm. Ils ne permettent pas de distinguer les différents échantillons du prisme de La Palisse (*Figure 5- 8d*). En conclusion, seul Ni montre des variations significatives entre les bords et le centre du prisme de La Palisse.

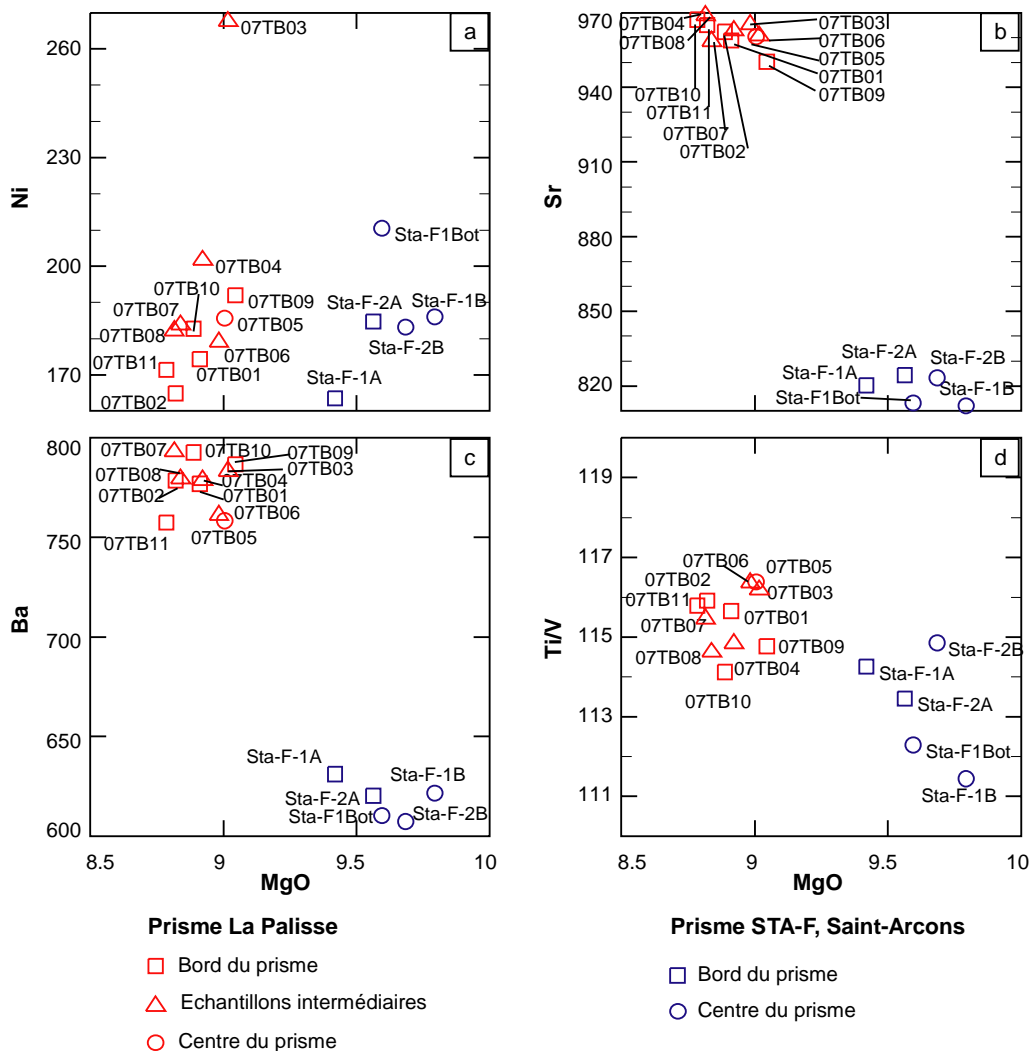


Figure 5- 8 : Diagrammes des compositions en éléments en traces (ppm) en fonction du MgO (% poids) des échantillons du bord et du centre du prisme de la coulée de La Palisse et du prisme STA-F de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier.

Pour le prisme STA-F, les teneurs en Ni varient de 183 à  $211 \pm 5$  ppm avec une gamme de variation de 164 à 191 ppm pour les échantillons du bord du prisme et de 183 à 211 ppm pour ceux du centre du prisme. Le diagramme Ni vs MgO (*Figure 5- 8a*) montre une corrélation positive, les échantillons du bord du prisme présentant les teneurs en Ni et MgO les plus faibles et ceux du centre les teneurs les plus élevées. Le Sr montre des teneurs variant de 812 à  $836 \pm 6$  ppm avec une gamme de variation de 820 à 836 ppm pour les échantillons du bord du prisme et de 812 à 823 ppm pour les échantillons du centre. Sur la *Figure 5- 8b*, nous observons une corrélation négative entre Sr et MgO, les teneurs les plus élevées en Sr correspondant aux teneurs les plus faibles en MgO. Les teneurs en Ba varient quant à elles de 607 à  $631 \pm 10$  ppm, avec des teneurs plus élevées pour le bord du prisme (de 611 à 631 ppm) par rapport au centre (de 607 à 621 ppm). Nous observons sur le diagramme Ba vs MgO (*Figure 5- 8c*) les mêmes tendances pour Sr, à savoir une corrélation négative avec MgO et des teneurs plus élevées pour les échantillons du bord du prisme. Enfin, le rapport Ti/V montre des variations allant de 111 à 115 ppm, celles-ci étant semblables selon l'emplacement.

### 3.2.2. Spectres de terres rares

Les compositions en terres rares, obtenues par ICP-AES sur des solutions pré-concentrées (cf chapitre 3), sont précisées en *Annexe II*. Les spectres de terres rares normalisés aux chondrites sont présentés sur la *Figure 5- 9*.

Les spectres de terres rares du prisme de La Palisse et du prisme de Saint-Arcons-d'Allier se présentent sous la même forme, avec un enrichissement important en terres rares légères (200 fois les chondrites pour La) et un enrichissement plus faible en terres rares lourdes (10 fois les chondrites pour Yb).

Pour le prisme de La Palisse de manière générale les échantillons issus du bord et du centre du prisme ne présentent pas de différence de concentration en REE. Dans le détail, seule la teneur en La montre de légères variations, avec un échantillon (07TB01) comprenant des concentrations un peu plus faibles (*Figure 5- 9a*). Cependant, les teneurs pour tous les échantillons varient de 54 à  $63 \pm 0,34$  ppm, avec des gammes de variations entre les échantillons du bord du prisme ( $54 < \text{La ppm} < 63$ ) et ceux du centre ( $60 < \text{La ppm} < 62$ ) identiques.

Pour le prisme de Saint-Arcons-d'Allier, les variations des teneurs en terres rares restent très faibles (*Figure 5- 9b*). Seul l'échantillon STA-F2A présente une teneur plus faible en La (38 ppm) que les autres échantillons, dont les teneurs varient de 45 à  $49 \pm 0,34$  ppm. Dans le détail, les échantillons issus du bord du prisme présentent une gamme de variation en La de 38 à 48 ppm (STA-F2A inclus) tandis que les échantillons situés vers le centre du prisme indiquent des gammes de variation de 45 à 49 ppm, la teneur la plus élevée correspondant à l'échantillon le plus proche du centre (STA-F1Bot). S'il semble à première vue que les teneurs en La soient donc plus élevées vers le centre, si l'échantillon STA-F1Bot est ignoré alors la gamme de variation des échantillons situés vers le centre est contenue dans celle des échantillons du bord du prisme. Par ailleurs, l'échantillon STA-F2B présente, en dehors de La, des teneurs en REE légèrement plus faible que les autres échantillons.



La mesure des teneurs en terres rares à l'échelle du prisme, que ce soit pour le prisme de La Palisse ou celui de Saint-Arcons-d'Allier, ne permet donc pas d'observer des variations systématiques en fonction de l'emplacement des échantillons dans le prisme.

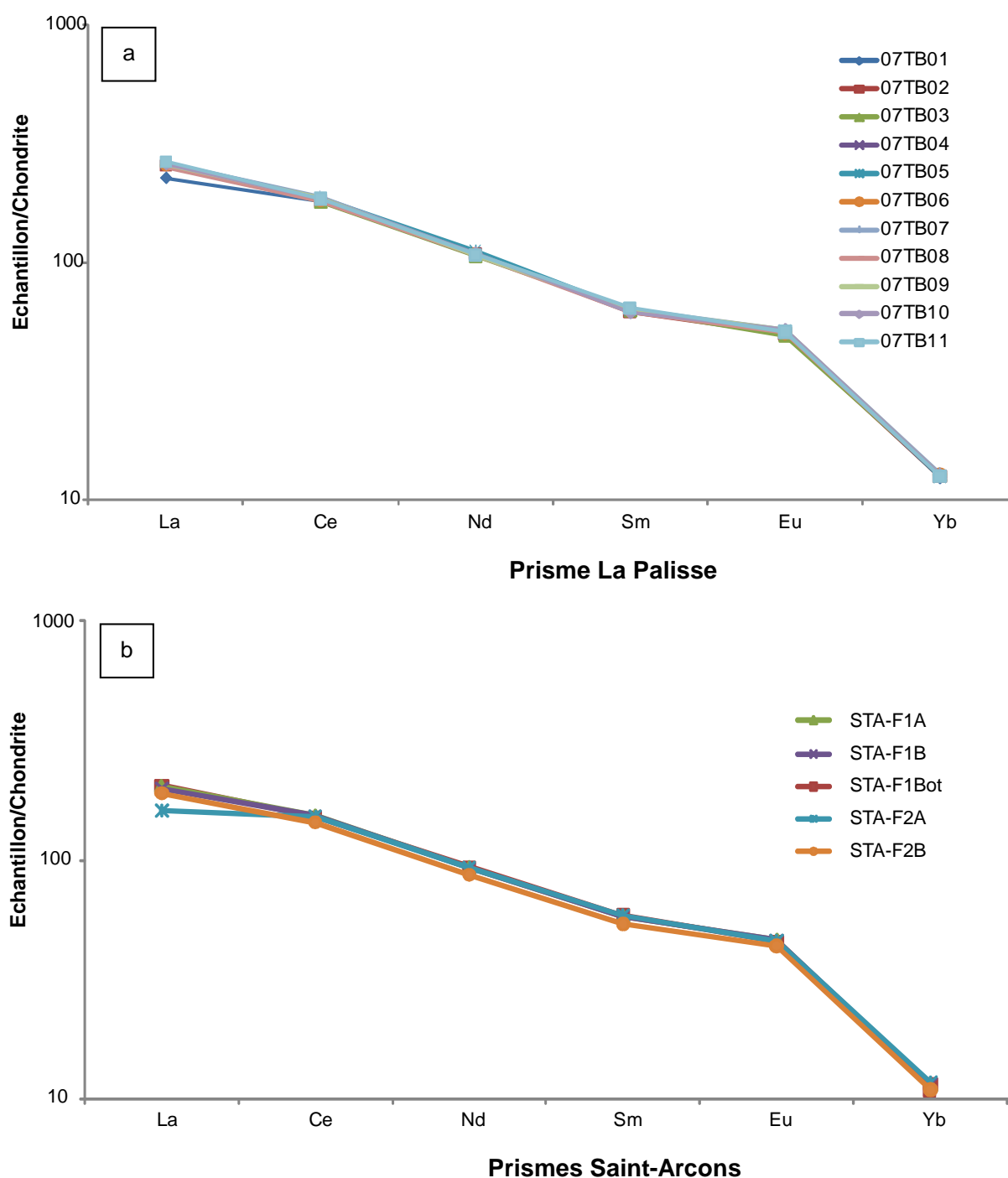


Figure 5- 9 : Spectres de terres rares normalisées aux chondrites (McDonough & Sun 1995) des échantillons issus du prisme de la coulée de La Palisse (a) et des échantillons issus des prismes STA-F et de la base de la colonne de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier (b).

*En conclusion*, pour le prisme de La Palisse, les diminutions des teneurs en  $K_2O$  dans les échantillons du bord du prisme peuvent être liées à l'altération des basaltes. Des observations

comparables ont été réalisées dans les basaltes de Karuma en Nouvelle Zélande par Moon et Jayawardane (2004). En revanche, comme aucune diminution des teneurs en CaO, MgO, Sr et Ba, également mobiles lors de l'altération des basaltes (Aiuppa et al., 2000), n'est observée dans le prisme de La Palisse, cet effet de l'altération en bordure semble relativement limité. Par ailleurs,  $P_2O_5$  est un élément supposé avoir le même comportement que  $K_2O$  au cours de l'altération (Sheldon, 2003). Pourtant, ce dernier montre une relation inverse avec des teneurs plus élevées au bord du prisme qu'au centre, ce qui ne soutient pas l'hypothèse de l'altération. Cependant, ayant trouvé des teneurs en Ni, élément compatible, plus élevées au centre du prisme qu'au bord, nous pourrions nous attendre à trouver des concentrations plus importantes d'éléments incompatibles comme le Sr et le Ba au bord du prisme. Or les teneurs en ces deux derniers éléments ne semblent pas varier du centre vers le bord. Ces éléments étant sensibles à l'altération, les concentrations plus élevées au bord du prisme pourraient être amoindries, ce qui expliquerait l'absence de variations. Suivant cette hypothèse, l'altération ne concernerait que les éléments  $K_2O$ , Sr et Ba, mais ne serait pas suffisamment importante pour toucher d'autres éléments tels que CaO et  $P_2O_5$ . Le Ni étant un élément compatible, il se concentre dans les premiers minéraux à cristalliser lors du refroidissement, tels que l'olivine. Deux hypothèses peuvent donc être émises pour expliquer que Ni soit plus concentré au centre du prisme par rapport au bord. La première hypothèse est que le centre du prisme soit plus concentré en olivine que les bords. Or nous avons montré qu'il n'y avait pas de différences de composition modale entre le bord et le centre du prisme. La seconde hypothèse est que la différence de composition chimique se fasse au niveau du verre avec un processus de diffusion différentielle des éléments. Cette dernière hypothèse, déjà évoquée dans le chapitre 3 pour expliquer les variations de composition entre la base et le sommet d'un fragment de prisme de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier, semble la plus plausible. Or la distribution du MgO est moins facile à interpréter étant donné que les gammes de variations sont semblables entre les échantillons du bord et du centre du prisme. Il est donc difficile de conclure clairement sur le degré de différenciation entre le centre et le bord du prisme de La Palisse.

Pour le prisme STA-F de Saint-Arcons-d'Allier, les teneurs en MgO sont les seules à montrer des variations entre le bord et le centre du prisme, avec des teneurs plus importantes au centre qu'au bord. Les teneurs en Ni, comme pour le prisme de La Palisse, sont plus importantes au centre du prisme et les teneurs en Sr et Ba plus importantes au bord du prisme. Comme pour le prisme de La Palisse, ces différences de composition pourraient être expliquées par un processus de diffusion des éléments dans la phase vitreuse.

Les variations en REE étant peu significatives, elles ne nous permettent pas d'apporter de nouveaux arguments dans la discussion.

### 3.3. Variations en éléments majeurs dans les minéraux (analyses in-situ)

Les compositions chimiques des plagioclases, clinopyroxènes et titanomagnétites des prismes de La Palisse (*Figure 5-1*), STA-F (*Figure 5-3a*) et de l'échantillon STA-B1 (*Figure 5-5*) issus du bord du prisme STA-B (*Figure 5-3c*) de Saint-Arcons-d'Allier sont analysées par microsonde électronique et la formule structurale (*Annexe III*) de chaque minéral est calculée. Les compositions en proportion des pôles purs des différentes espèces minérales sont ensuite calculées. Pour les clinopyroxènes, les

compositions sont reportées en proportion de wollastonite (Wo), enstatite (En) et ferrosillite (Fs) et pour les plagioclases en proportion d'anorthite (An), albite (Ab) et orthose (Or) (*Tableau 5- 1*). Pour les titanomagnétites, les proportions moléculaires FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et TiO<sub>2</sub> puis les proportions d'ulvöspinelle  $x_{\text{Ulvosp}}$  sont calculées à partir de l'hypothèse suivante :  $\text{Fe}_{\text{tot}} = 1/3 \text{Fe}^{2+} + 2/3 \text{Fe}^{3+}$  (*Tableau 5- 2*).

	Clinopyroxènes				Plagioclases			
	N	Wo	En	Fs	N	An	Ab	Or
<b>La Palisse</b>								
Bord du prisme	9	46,6 - 50,4	34,2 - 41,2	11,6 - 16	7	49,3 - 51,9	45,3 - 47,7	2,7 - 3,1
Centre du prisme	4	47,2 - 50	36,9 - 41,8	10,9 - 13,8	2	49,9 - 51,8	45,1 - 47,1	2,9 - 3,1
<b>Saint-Arcons-d'Allier</b>								
Bord du prisme	12	46,7 - 50,9	33,4 - 43,7	9,5 - 15,7	8	62,6 - 67	31,5 - 36	1,4 - 1,9
Centre du prisme	11	47,1 - 51,5	29,2 - 42,3	9,6 - 20,3	10	60,1 - 65,8	33 - 38,1	1,2 - 2
STA-b1-zone1	2	51,1 - 51,9	31,6 - 32,3	16,5 - 16,6	2	65,1 - 66,7	31,7 - 33,1	1,6 - 1,8
STA-b1-zone2	2	51,3 - 51,5	33,4 - 35,7	13 - 15,1	2	64,3 - 61,2	34 - 36,8	1,6 - 2
STA-b1-zone3	2	51,4 - 51,7	32,2 - 33,9	14,5 - 16,4	3	64,3 - 66	32,2 - 33,9	1,6 - 1,8

Tableau 5- 1 : Proportions moléculaires en wollastonite (Wo), entastite (En) et ferrosillite (Fs) pour les clinopyroxènes et en anorthite (An), albite (Ab) et orthose (Or) pour les plagioclases, des échantillons issus du bord et du centre des prismes de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier, ainsi que des différentes zones de l'échantillon STA-B1. N est le nombre de grains analysés.

Pour le prisme issu de la coulée de La Palisse, les clinopyroxènes possèdent des proportions en Wo de 47 à 50 % avec des gammes de variation comparables entre les clinopyroxènes issus du bord du prisme et du centre ( $47 < \text{Wo} \% < 50$ ). Les proportions en En varient de 34 à 42 % avec une gamme de variation pour les clinopyroxènes issus du bord du prisme de 34 à 41 % et de 37 à 42 % pour ceux du centre du prisme. Les proportions en Fs varient de 11 à 16 % avec une gamme de variation de 12 à 16 % pour les clinopyroxènes du bord du prisme et de 11 à 14 % pour les clinopyroxènes du centre du prisme. Le report de ces données dans un diagramme ternaire Wo-En-Fs (*Figure 5- 10b*) montre que les clinopyroxènes ont tendance à s'enrichir en Fe (donc en Fs) quand la proportion en Wo augmente. Cette tendance se produit sans distinction entre les clinopyroxènes du centre et du bord du prisme.

Pour le prisme STA-F de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier, les proportions de Wo varient de 47 à 52 % avec une gamme de variation comparable entre les clinopyroxènes du bord et du centre du prisme. Les proportions en En varient de 29 à 44 % avec une gamme de variation de 33 à 44 % pour le bord du prisme et de 29 à 42 % pour le centre du prisme. Les clinopyroxènes du bord du prisme présentent une gamme de variation des proportions en Fs de 10 à 16 % et les clinopyroxènes du centre du prisme indiquent une gamme de variation un peu plus étendue, de 10 à 20 %. Le diagramme ternaire Wo-En-Fs (*Figure 5- 10c*) montre également un enrichissement en Fs quand les proportions en Wo augmentent.

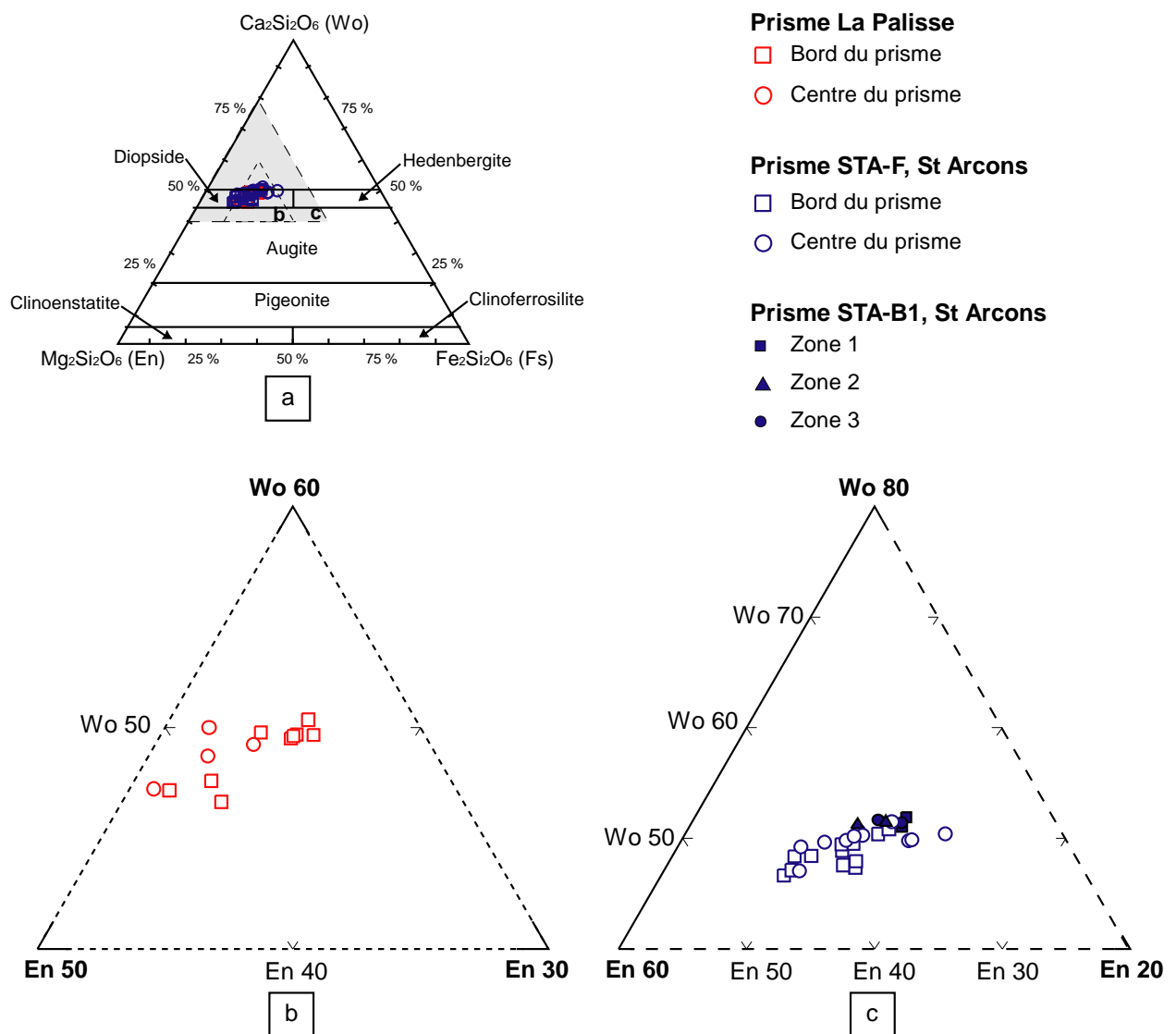


Figure 5- 10 : Compositions chimiques des clinopyroxènes des échantillons issus des prismes de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier obtenues par microsonde électronique. (a) Nomenclature utilisée pour décrire ces données (Morimoto, 1988). Les diagrammes ternaires présentés en (b) et (c) sont indiqués en grisé. (b) Diagramme ternaire Wo-En-Fs des clinopyroxènes du bord et du centre du prisme de La Palisse (c) Diagramme ternaire Wo-En-Fs des clinopyroxènes du bord et du centre du prisme STA-F, et des zones 1,2 et 3 de l'échantillon STA-B1 de Saint-Arcons-d'Allier.

Pour le prisme STA-B, les clinopyroxènes des 3 zones de l'échantillon STA-B1 (Figure 5) présentent des variations faibles des proportions en Wo (de 51 à 52 %). Les proportions en En varient de 32 à 36 % avec des proportions plus élevées pour les clinopyroxènes de la zone 2 et 3. Les proportions en Fs varient de 13 à 17 % avec la proportion la plus élevée pour les clinopyroxènes de la zone 1. Le diagramme ternaire (Figure 5-10c) montre que les clinopyroxènes de la zone 2 (intermédiaire) sont moins riches en Fe que ceux des zones 1 et 3. Ainsi, que ce soit pour le prisme de La Palisse ou les prismes de Saint-Arcons-d'Allier les gammes de variations entre les proportions en Wo, En et Fs restent globalement comparables entre elles. Elles ne permettent pas d'attribuer clairement une composition de clinopyroxène à une position dans le prisme (bord et centre).

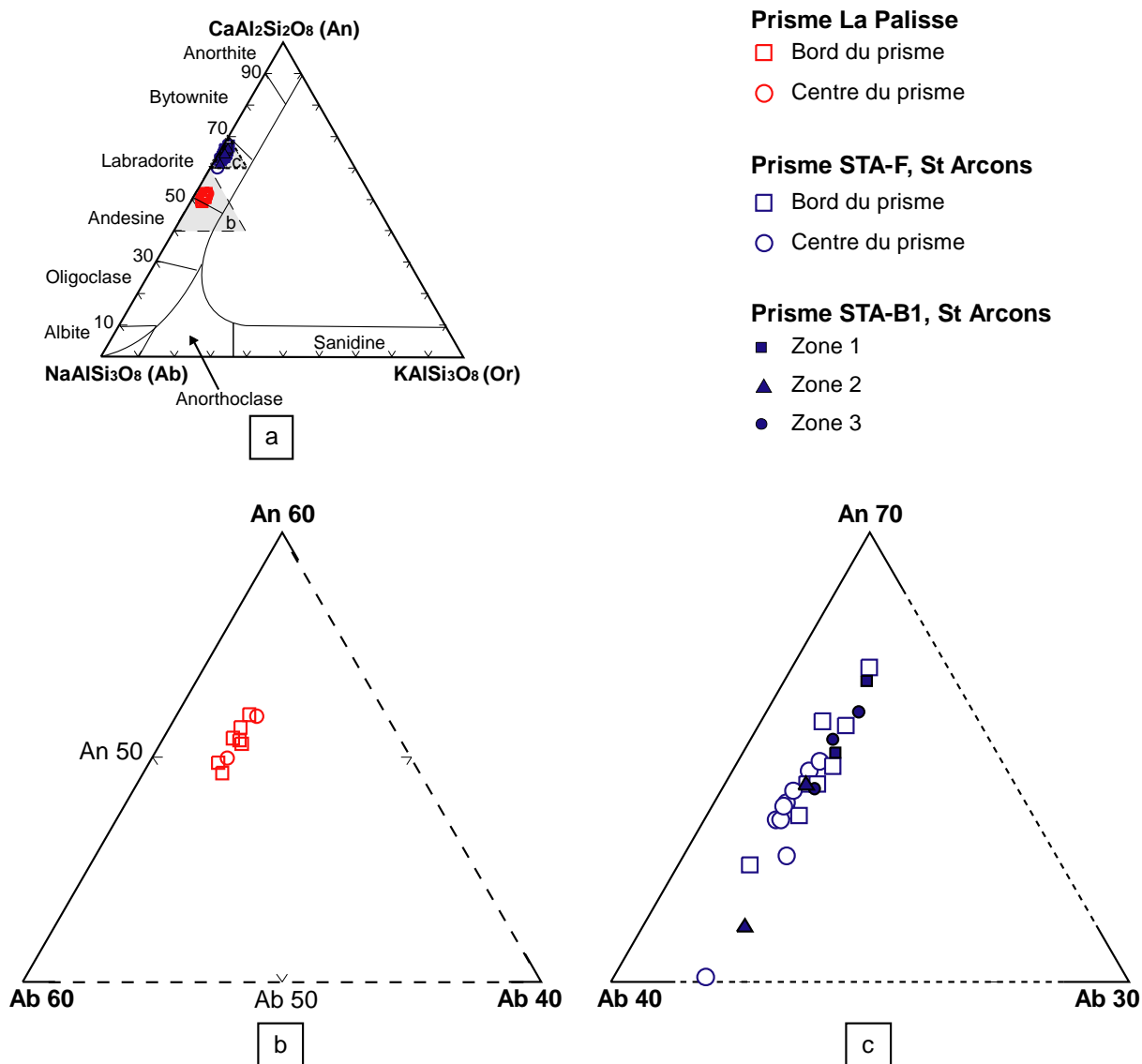


Figure 5- 11 : Compositions chimiques des plagioclases des échantillons issus des prismes de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier obtenues par microsonde électronique. (a) Nomenclature utilisée pour décrire ces données (Smith & Brown, 1988). Les diagrammes ternaires présentés en (b) et (c) sont indiqués en grisé. (b) Diagramme ternaire An-Ab-Or des plagioclases du prisme de La Palisse. (c) Diagramme ternaire An-Ab-Or des plagioclases issus du bord et du centre du prisme STA-F, et des 3 zones de l'échantillon STA-B1 de Saint-Arcons-d'Allier.

Les plagioclases du prisme de La Palisse présentent des variations en proportions An de 49 à 52 % avec une gamme de variation semblable pour les plagioclases du bord et du centre du prisme. Les proportions en Ab sont également comparables entre les différentes parties du prisme, avec des gammes de variations de 45 à 48 %. Les proportions en Or varient très peu (environ 3 %). Le diagramme ternaire An-Ab-Or (*Figure 5- 11b*) confirme qu'il n'y a pas de distinction en composition entre les plagioclases du centre et du bord du prisme.

Le prisme STA-F de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier présente des plagioclases dont la proportion An varie de 60 % à 67 %, avec une gamme de variation de 63 à 67 % pour les plagioclases du bord du prisme et de 60 à 66 % pour les plagioclases du centre. Les proportions en Ab varient de 32 à 38 % avec une gamme de variation de 32 à 36 % pour les plagioclases du bord et de 33 à 38 % pour ceux du centre. Les proportions en Or sont comparables entre les plagioclases du centre et du bord avec une gamme de variation de 1,2 à 2 %. Le diagramme ternaire An-Ab-Or

(Figure 5- 11c) montre que, même si les plagioclases du centre du prisme présentent des proportions en An plus faibles que les plagioclases du bord, les gammes de variation se recoupent en grande partie. Ces résultats ne nous permettent pas d'isoler des compositions particulières de plagioclases selon leur emplacement dans le prisme.

Pour le prisme STA-B1, les plagioclases possèdent des compositions qui varient très peu entre les 3 zones, avec des gammes de variations de  $64 < \text{An} \% < 67$  %,  $32 < \text{Ab} \% < 37$  et  $1,6 < \text{Or} \% < 2$ . Seuls les plagioclases de la zone 2 montrent des proportions en An plus faibles que les plagioclases des 2 autres zones ( $64 < \text{An}\% < 61$  ;  $34 < \text{Ab} \% < 37$  ;  $1,6 < \text{Or} \% < 2$ ). Le diagramme ternaire (Figure 5- 11c) indique qu'en réalité seul un des deux plagioclases de la zone 2 se trouve en dehors de la majorité des compositions des différentes zones. Il est alors difficile d'attribuer une composition chimique spécifique à chaque zone de l'échantillon STA-B1.

Les analyses des oxydes à la microsonde électroniques sont présentées en *Annexe III*. Le *Tableau 5- 2* indique les proportions d'ulvöspinelle calculées à partir de la formule structurale et utilisées dans les diagrammes ternaires (Figure 5- 12). Les hypothèses de calcul sont indiquées dans l'*Annexe III*.

Pour le prisme de La Palisse, les proportions d'ulvöspinelle varient de 0,57 à 0,69. La gamme de variation est sensiblement la même pour les titanomagnétites du centre du prisme ( $0,53 < x_{\text{Ulvops}} < 0,69$ ) que pour celles du bord du prisme ( $0,57 < x_{\text{Ulvops}} < 0,68$ ). Le diagramme ternaire  $\text{TiO}_2\text{-FeO-Fe}_2\text{O}_3$  (Figure 5- 12b) n'indique pas de variation de composition particulière entre les titanomagnétites du centre et celles du bord du prisme.

Pour le prisme STA-F de Saint-Arcons-d'Allier, les proportions d'ulvöspinelle varient de 0,51 à 0,73, avec une gamme de variation de 0,51 à 0,54 pour les titanomagnétites du bord du prisme, et de 0,52 à 0,73 pour celles du centre du prisme. La plus forte valeur de  $x_{\text{Ulvosp}}$  (0,73) correspond à une seule titanomagnétite. Sans cette valeur, la proportion d'ulvöspinelle ne varierait que de 0,52 à 0,53. Les gammes de variation de ces proportions sont alors comparables avec les titanomagnétites issus du bord du prisme. Ceci apparaît clairement sur le diagramme ternaire  $\text{TiO}_2\text{-FeO-Fe}_2\text{O}_3$  (Figure 5- 12c), qui ne permet pas de distinguer des compositions particulières pour les titanomagnétites selon leur emplacement au sein du prisme.

	Titanomagnétites				
	N	$x_{\text{Ulvosp}}$	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
<b>La Palisse</b>					
Bord du prisme	7	0,57 - 0,68	59,8 - 62	15,6 - 17,7	23 - 25,1
Centre du prisme	4	0,53 - 0,69	58,7 - 60,9	13,6 - 17,1	23,2 - 24,4
<b>Saint-Arcons-d'Allier</b>					
Bord du prisme	6	0,51 - 0,54	63,4 - 68,2	13,5 - 14,9	26,5 - 28,7
Centre du prisme	6	0,52 - 0,73	59 - 67	14,1 - 20,5	20,3 - 28,1
STA-b1-zone1	2	0,41 - 0,43	59,8 - 64	12 - 13,1	25,8 - 28,3
STA-b1-zone2	2	0,41 - 0,51	63,2 - 65,8	12,6 - 13	27,9 - 28,1
STA-b1-zone3	2	0,42 - 0,46	63 - 65,6	12,4 - 12,7	27,9 - 28,5

Tableau 5- 2 : Compositions des titanomagnétites  $\text{Fe}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$  issues du bord et du centre des prismes de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier.  $x_{\text{Ulvosp}}$  est la proportion d'ulvöspinelle, FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et TiO<sub>2</sub> sont en proportions molaires. N est le nombre de grains analysés.



Pour l'échantillon STA-B1, les titanomagnétites possèdent des proportions d'ulvöspinelle de 0,41 à 0,51, avec la plus forte valeur pour la zone 2. Les proportions de FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et TiO<sub>2</sub> montrent des gammes de variations semblables entre les titanomagnétites du bord et celles du centre du prisme. Le diagramme ternaire de la *figure 5-12c* confirme qu'il n'y a pas de composition caractéristique des titanomagnétites de chaque zone pour l'échantillon STA-B1.

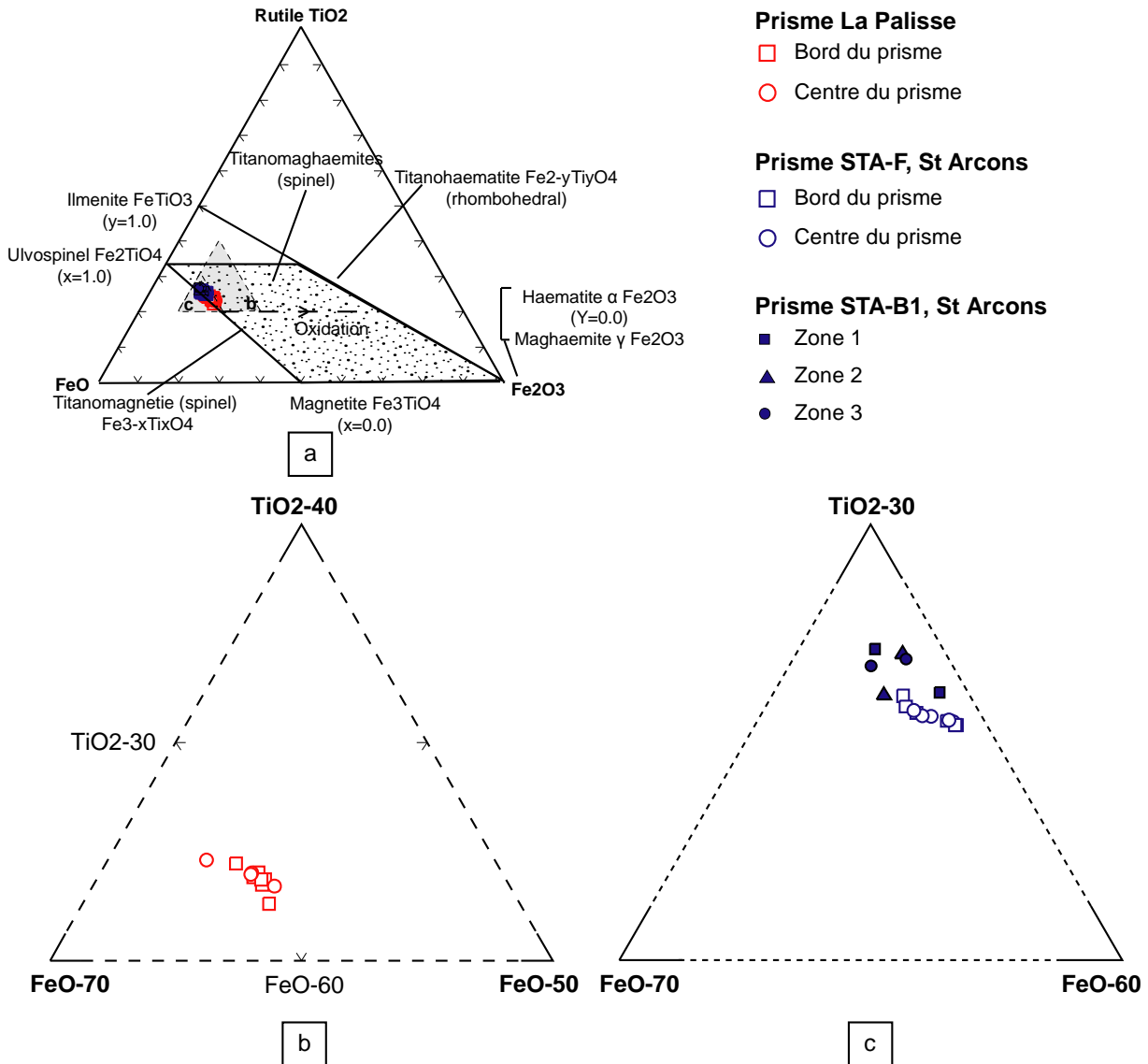


Figure 5- 12 : Diagrammes ternaires TiO<sub>2</sub>-FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. (a) Classification des oxydes Fe-Ti montrant les solutions solides magnétite - ulvöspinelle, hématite – ilménite (Clark, 1997). Les diagrammes ternaires présentés en (b) et (c) sont indiqués en grisé. (b) Diagramme ternaire correspondant aux oxydes du bord et du centre du prisme de La Palisse. (c) Diagramme ternaire des oxydes du bord et du centre du prisme STA-F et des 3 zones de l'échantillon STA-B1 de Saint-Arcons-d'Allier.

### 3.4. Variations des isotopes stables de l'hydrogène et de l'oxygène

Des mesures du rapport isotopique de l'hydrogène et de l'oxygène ont été faites sur le prisme de la coulée de La Palisse (échantillons 07tb02 et 07tb05) (*Figure 5- 1*) et sur les prismes STA-F et

STA-G de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier (*Figure 5- 3a et d*). Pour le prisme de La Palisse et STA-F, les échantillons mesurés sont les mêmes que ceux utilisés pour l'analyse de la composition en éléments majeurs, traces et terres rares obtenus par le broyage d'échantillons issus du carottage. Dans le détail, les échantillons du prisme STA-F sont identiques à ceux utilisés pour l'analyse chimique avec les carottes STA-F1 et STA-F2 et les spécimens A, B et Bot. La méthode d'échantillonnage est différente pour le prisme STA-G, où les prélèvements ont été directement effectués sur le prisme à l'aide d'une fraise de dentiste équipée d'une pointe diamantée. Nous avons ainsi effectué des prélèvements en évitant le maximum les inclusions de socle visibles à l'œil nu, ces inclusions pouvant masquer les rapports isotopiques propres à la lave. Ce prisme présentant également des zonations, des prélèvements ont été effectués uniquement dans la largeur des bandes que forment ces zonations. La *figure 5-3d* présente le numéro des échantillons ainsi que leur emplacement sur le prisme STA-G. Le *Tableau 5- 3* indique le pourcentage d'eau déduit lors de l'extraction de l'hydrogène des échantillons et les  $\delta D$  et  $\delta^{18}O$  des échantillons issus des prismes de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier.

Prisme	Echantillons	% eau dans l'échantillon	dD (‰VSMOW)	Erreur	d18O (‰VSMOW)		moy.	écart type
STA-G	1	1.01	-81.3	0.064				
	2	0.51	-83.2	0.054	6.52	6.66	6.59	0.10
	3	0.31	-106.7	0.166				
	4	0.61			6.35			
	5	0.41	-92.0	0.156	6.81			
	5	0.42	-90.2	0.082				
	6	0.37	-81.7	0.121	6.08			
	6	0.48	-87.5	0.124				
	7	0.61	-81.7	0.094	6.60			
	7	0.78	-84.0	0.082				
	8	0.65	-87.9	0.070	5.87	6.06	5.97	0.13
	9	0.84	-82.7	0.093	5.87			
	10	0.89	-90.2	0.046	6.54	6.42	6.48	0.08
	10	0.76	-90.0	0.075				
	11	0.69	-81.2	0.088	6.58			
STA-F	STA-F1A	0.46	-81.0	0.127	6.51			
	STA-F1B	0.57	-86.1	0.122	6.44			
	STA-F1BOT	0.35	-93.0	0.100	6.35			
	STA-F1BOT	0.33	-105.2	0.095				
La Palisse	07TB05	0.21	-100.0	0.101	6.52			
	07TB05	0.19	-101.7	0.080				
	07TB02(2)	0.28	-79.0	0.076	6.23			
	07TB02(1)	0.30	-81.0	0.140				

Tableau 5- 3 : Rapports isotopiques de l'hydrogène et de l'oxygène des échantillons issus des prismes de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier (STA-F et STA-G). Les pourcentages d'eau reportés sont mesurés au cours de la procédure d'extraction de l'hydrogène.

Le prisme de La Palisse présente des pourcentages d'eau qui varient de 0,19 à 0,30 %, avec des pourcentages d'eau plus élevés pour les échantillons du bord du prisme (de 0,28 à 0,30 %) et plus faibles pour ceux du centre (de 0,19 à 0,21 %). Une corrélation positive entre le pourcentage d'eau et  $\delta D$  est observée (*Figure 5- 13a*). Pour le  $\delta^{18}O$ , les échantillons du centre du prisme, donc ceux qui présentent le moins d'eau, présentent des  $\delta^{18}O$  plus élevés (6,52 ‰) que ceux situés au centre (6,23 ‰) (*Figure 5- 13b*).

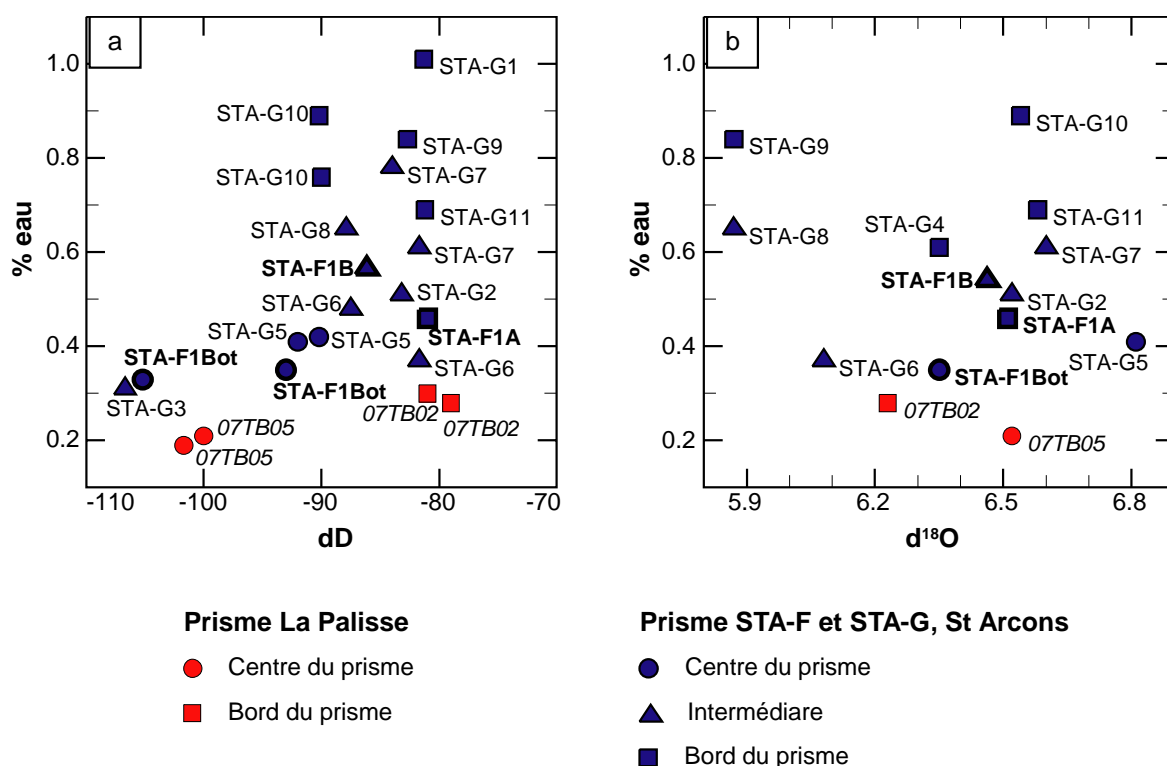


Figure 5- 13 : Données issues de l'extraction de l'hydrogène et de l'oxygène des échantillons prélevés dans les prismes de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier STA-G et STA-F. (a) Pourcentage d'eau dans l'échantillon en fonction de  $\delta D$ , (b) pourcentage d'eau dans l'échantillon en fonction de  $\delta^{18}O$ .

Pour le prisme STA-G, le pourcentage d'eau dans l'échantillon varie selon l'emplacement dans le prisme : le pourcentage le plus élevé est de 1 % pour l'échantillon n°1 (*Figure 5-3d*), situé dans la zonation 1 et qui suit les bords du prisme, alors que le pourcentage le plus faible est de 0,31 % pour l'échantillon n°3, situé dans la zone centrale du prisme. De manière générale, les échantillons situés dans la zone centrale du prisme (n°2, 3, 5 et 6) possèdent des pourcentages d'eau variant de 0,31 à 0,51 %, et les échantillons situés dans la zonation la plus externe (n°1 et 10) indiquent des pourcentages de 0,76 à 1,01 %. Les échantillons 7 et 11 prélevés dans la seconde zonation, ainsi que les échantillons situés entre les deux zonations (n°4, 8 et 9) possèdent des teneurs intermédiaires, comprises entre 0,61 et 0,84 % d'eau. Les pourcentages d'eau sont donc de plus en plus importants aux bords du prisme par rapport au centre. Le pourcentage d'eau en fonction de  $\delta D$  (*Figure 5- 13a*) ne montre cependant pas de relation entre ces deux paramètres. Cette même constatation est faite avec le  $\delta^{18}O$  (*Figure 5- 13b*).

Pour le prisme STA-F, l'échantillon STA-F1A, issu du bord du prisme, possède un pourcentage d'eau de 0,46, l'échantillon STA-F1B, situé à 2 cm du bord du prisme, de 0,57 tandis que les échantillons STA-F1Bot, qui correspondent au fond de la carotte, présentent un pourcentage d'eau de 0,33 à 0,35 %. Les diagrammes présentés *figures 5-13a et b* ne montrent de corrélation entre le pourcentage d'eau et le  $\delta D$  ou le  $\delta^{18}O$ . Cependant, nous observons que les  $\delta D$  et les  $\delta^{18}O$  diminuent du bord vers le centre du prisme.

En résumé, les prismes qui présentent le moins d'échantillons analysés montrent des corrélations entre les pourcentages en eau, le  $\delta D$  ou le  $\delta^{18}O$ . Les analyses ayant été effectuées dans les mêmes conditions, la seule différence entre les analyses des prismes de La Palisse, STA-F et STA-G est la méthode de prélèvement des échantillons et notamment la masse des échantillons. Les échantillons des prismes de La Palisse et STA-F pesaient environ 20 g alors que les échantillons du prisme STA-G moins de 1 g lors du prélèvement. Les hétérogénéités de l'échantillon comme les xénocristaux de socle qui peuvent être invisible à l'œil nu, auront plus d'influence dans un échantillon dont la masse est petite que pour un échantillon de masse plus importante. Les échantillons du prisme STA-G seraient moins représentatifs que les échantillons des prismes de La Palisse et STA-F, et le manque de corrélations entre le pourcentage d'eau, le  $\delta D$  ou le  $\delta^{18}O$  pourrait être un artefact.

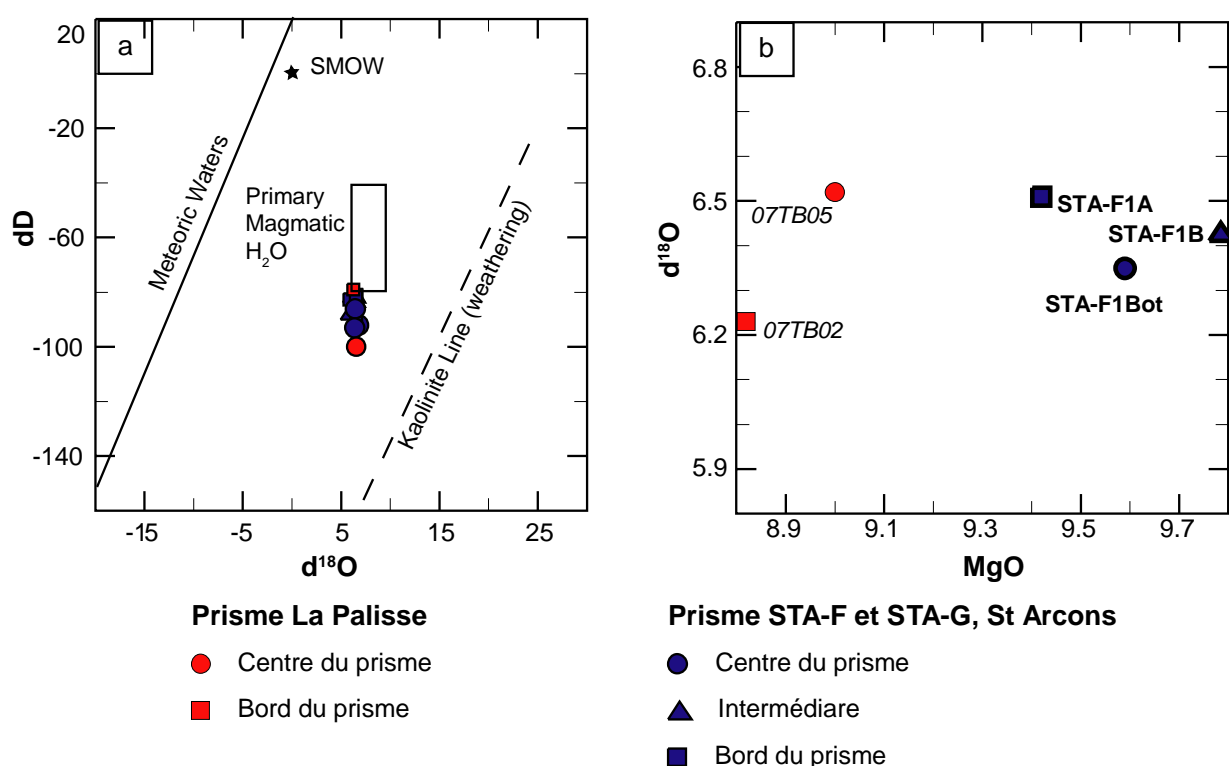


Figure 5- 14 : Données isotopiques de l'hydrogène et de l'oxygène des prismes de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier (STA-F et STA-G). (a)  $\delta D$  en fonction de  $\delta^{18}O$  avec les valeurs correspondantes aux eaux magmatiques primaires (Sheppard et al., 1969), eaux météoriques, SMOW et à la ligne des kaolinites (Savin and Epstein, 1970).

Les  $\delta^{18}O$  des échantillons des prismes de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier montrent une gamme de variations comparables à celles des eaux magmatiques primaires (Figure 5- 14a), mais les  $\delta D$  sont plus faibles que ceux des eaux magmatiques primaires comme décrit dans le chapitre 3. Les  $\delta D$  et  $\delta^{18}O$  des échantillons issus des différents prismes ne montrent pas de tendance vers la ligne des eaux météoriques ou la ligne de la kaolinite qui refléterait soit un hydrothermalisme soit un processus d'altération.

Les  $\delta^{18}O$  des prismes de La Palisse et SAT-F de Saint-Arcons-d'Allier sont reportés dans un diagramme en fonction de MgO (Figure 5- 14b). Les données du prisme STA-G ne sont pas reportées dans ce diagramme car les quantités d'échantillons sont trop faibles pour permettre une mesure des éléments majeurs par fluorescence X de chaque échantillon. Les  $\delta^{18}O$  ne semblent pas

varier avec le MgO. Les échantillons du prisme de La Palisse possèdent des teneurs en MgO plus faibles que pour le prisme de Saint-Arcons-d'Allier, comme déjà décrit dans le chapitre 3. Les  $\delta^{18}\text{O}$  des deux prismes montrent des gammes de variations comparables entre elles.

*En résumé*, les données isotopiques de l'hydrogène et de l'oxygène ne permettent pas de mettre en évidence des caractéristiques spécifiques entre les échantillons issus du bord du prisme et ceux du centre. Des variations entre le bord et le centre du prisme sont observées pour le prisme STA-F mais ne sont pas corrélées au pourcentage d'eau dans les échantillons. La seule conclusion que l'on peut tirer de ces données est que le faible pourcentage d'eau et les variations des rapports isotopiques montrent que l'effet de l'altération à haute et basse température est très faible dans les échantillons étudiés. Cependant, nous observons que les bords du prisme possèdent des teneurs en eau plus élevées par rapport au centre. Nous avons également décrit que la vésiculation est plus importante vers les bords du prisme. Si cette vésiculation était la conséquence d'un dégazage, nous devrions observer une diminution de la teneur en eau. Or ce n'est pas ce qui est observé dans notre cas. Cette vésiculation pourrait être le siège d'une accumulation d'eau à un stade post-magmatique, mais nous n'avons pas mis en évidence l'effet de l'eau météorique dans nos échantillons.

## Partie II : Études pétrophysiques

### 1. Variation magnétique : ASM et propriétés d'hystérésis

Nous avons sélectionné un prisme dans chacune des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier. Celui de La Palisse est issu de la colonnade du site d'échantillonnage près du barrage (site 1). Son orientation géographique a été relevée avant le prélèvement afin de comparer l'orientation de l'écoulement déduit du terrain et celle déduite de l'ASM. Le prisme de Saint-Arcons-d'Allier est issu de la colonnade mais n'est pas en place. Une tranche de 2 cm d'épaisseur a été coupée dans la section de chaque prisme, puis subdivisée en cubes de 2 cmx2 cm (Figure 5- 15).

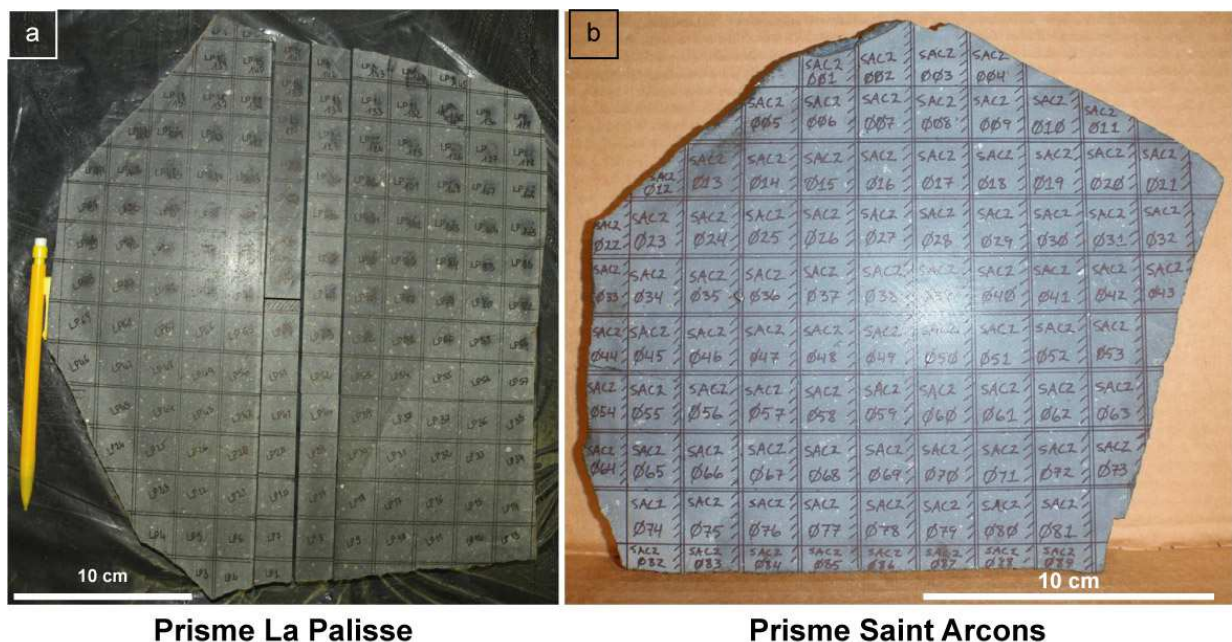


Figure 5- 15 : Photos des prismes issus de (a) la coulée de La Palisse et (b) la coulée de Saint-Arcons-d'Allier. Le quadrillage représente les cubes de 2cmx2cm découpés pour les mesures d'ASM.

#### 1.1. Variation des paramètres et des fabriques d'anisotropie de susceptibilité magnétique

##### 1.1.1. Le prisme de La Palisse

Des mesures de la susceptibilité magnétique en fonction de la température (courbes thermomagnétiques) ont été effectuées sur les échantillons du bord (07TB02) et du centre (07TB05) du prisme de La Palisse (Figure 5-1). Les courbes thermomagnétiques de ces deux échantillons (Figure 5- 16) sont identiques avec un comportement réversible et une température de Curie de 105°C. Ces courbes nous indiquent que le minéral porteur du magnétisme est essentiellement de la titanomagnétite riche en Ti (O'Reilly 1984).



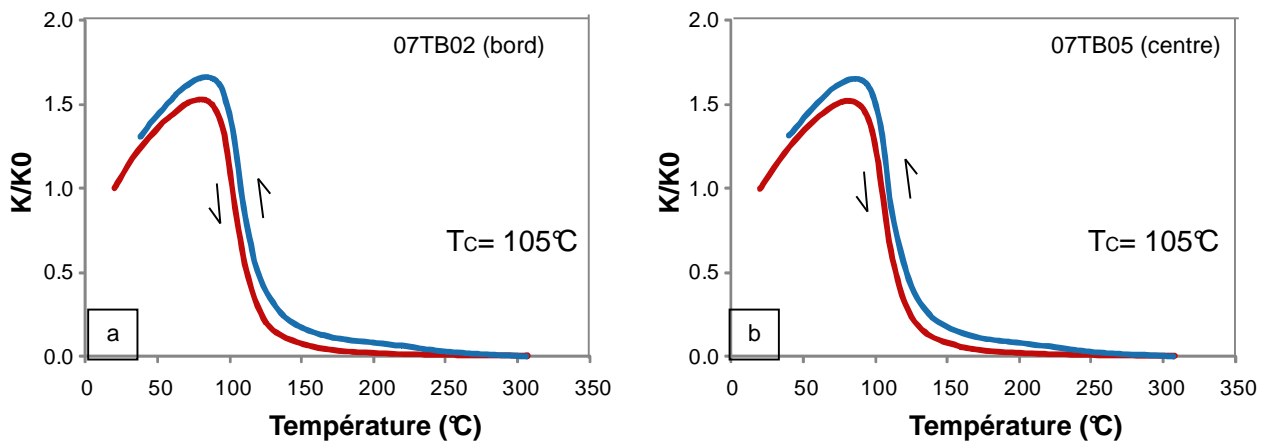


Figure 5- 16 : Courbes de susceptibilité magnétique normalisées à  $k_0$  (susceptibilité totale à température ambiante) en fonction de la température pour les échantillons du prisme de La Palisse au bord (a) et au centre (b).

Pour le prisme de La Palisse (*Figure 5- 15a*), 134 cubes ont été mesurés sur le MFK1 Kappabridge de l'université Jean Monnet à Saint Etienne. Nous avons fait le choix de présenter les fabriques de 30 échantillons du bord vers le centre du prisme (*Figure 5- 17b*) avec un nombre égal d'échantillons (10) pour le bord du prisme, le centre du prisme et une zone intermédiaire entre le bord et le centre (*Figure 5- 17a*) afin de mieux visualiser d'éventuelles variations des fabriques. Les fabriques magnétiques de chaque groupe d'échantillons en fonction de leur position sur le prisme sont également représentées. En utilisant la théorie de l'imbrication (cf chapitre 4), la direction et le sens d'écoulement déduits de l'ASM (flèche blanche) correspondent à ceux reportés sur le prisme à partir des données de terrain (flèche noire), ce qui conforte l'hypothèse de l'imbrication et l'utilisation de l'angle entre la normale au plan d'écoulement et  $k_3$  pour déterminer la direction et le sens de l'écoulement. Nous constatons également que quel que soit l'emplacement de l'échantillon dans le prisme, l'orientation des axes principaux de susceptibilité magnétique ( $k_1$ ,  $k_2$  et  $k_3$ ) reste pratiquement inchangée (*Figure 5- 17c*). Par contre, nous observons que les échantillons issus du bord du prisme présentent une dispersion plus importante des orientations des axes  $k_1$ ,  $k_2$  et  $k_3$  et donc une ellipse de confiance plus large que les échantillons au centre du prisme. Les mesures d'ASM dans la partie médiane du prisme suggèrent que cette dispersion augmente relativement régulièrement du centre vers le bord du prisme. Les caractéristiques des fabriques magnétiques observées sur les 30 échantillons présentés ici sont les mêmes pour les 30 autres échantillons situés dans la partie droite du prisme, ce qui confirme les variations de fabriques entre le centre et le bord du prisme de La Palisse et implique, qu'au second ordre, la formation des prismes pourrait avoir une influence sur l'intensité de la fabrique des axes de susceptibilité magnétique.

Le degré d'anisotropie  $P'$ , la susceptibilité moyenne  $K_m$  et le paramètre de forme  $T$  (Jelinek 1981) sont également étudiés (*Figure 5- 17d*). Dans le diagramme  $P'$  en fonction de  $K_m$ , la susceptibilité moyenne varie de  $33,3 \cdot 10^{-3}$  à  $36,7 \cdot 10^{-3}$  SI sans distinction entre les trois groupes d'échantillons, contrairement au degré d'anisotropie qui augmente vers le centre avec une valeur moyenne de 2,9 % pour les échantillons du bord, 3,5 % pour les échantillons intermédiaires et 3,9 % pour ceux du centre (Tableau des valeurs en *annexe IV*). Les valeurs du paramètre  $T$  indiquent des ellipsoïdes de forme « oblate » pour presque tous les échantillons ( $0 < T < 1$ ). Il est à noter que les valeurs de  $T$  sont plus homogènes pour les échantillons du centre (autour de 0,326) que pour les échantillons en bordure, qui varient de  $T = -0,0038$  à  $T = 0,910$ .

Afin de mieux observer les variations des paramètres d'anisotropie sur le prisme de La Palisse, des cartes de distribution des trois paramètres  $P'$ ,  $K_m$  et  $T$  ont été réalisées à l'aide du logiciel de construction de modèle numérique (Surfer 8) et de cartographie 3D (3Dfield) (*Figure 5- 18*). La carte de distribution de la susceptibilité moyenne ( $K_m$ ) indique que les valeurs sont plus importantes vers le centre du prisme et diminuent vers les bords à l'exception du bord droit du prisme qui présente des valeurs similaires à celles du centre. Pour le degré d'anisotropie  $P'$ , les valeurs les plus élevées sont regroupées le long de la médiane perpendiculaire au sens d'écoulement avec des valeurs qui diminuent de part et d'autre de cette médiane à l'exception d'une valeur plus élevée dans le coin inférieur droit du prisme. Pour le paramètre de forme  $T$ , les valeurs les plus positives sont regroupées dans la partie inférieure droite du prisme et les plus négatives dans la partie supérieure gauche, ce qui indique que les fabriques sont plus aplaties (oblate) dans la partie inférieure droite du prisme, plus allongées (prolate) dans la partie supérieure gauche et neutre (triaxial) dans le reste du prisme. Il faut toutefois préciser que si le modèle numérique de terrain nous permet de mieux visualiser les variations de ces différents paramètres au sein d'un prisme, la valeur de l'équidistance choisie entre les courbes de niveau peut faire ressortir fortement une valeur plus importante par rapport à celles qui l'entourent et donner l'impression d'une grande variation alors qu'il ne s'agit que d'une valeur isolée. Les courbes de niveau qui dépassent les bordures du prisme ont également un effet gênant. Nous avons donc également représenté les variations des paramètres magnétiques sous forme de cartes « mosaïques » où une couleur est attribuée à un intervalle de valeur pour chaque paramètre (*Figure 5- 19*). Ces cartes, bien qu'étant moins esthétiques, confirment les variations mises en évidence sur les cartes en courbes d'isovaleur.

### 1.1.2. Le prisme de Saint-Arcons-d'Allier

Des courbes thermomagnétiques ont été réalisées sur des échantillons issus du prisme de Saint-Arcons-d'Allier de la base (STA-4-4) vers le sommet (STA-2-2), en distinguant les échantillons issus du bord du prisme (spécimens A) et ceux du centre (spécimens D) (*Figure 5- 20*). La courbe thermomagnétique présentée en *Figure 5-19a* est représentative du comportement de tous les échantillons issus de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier. Une légère hausse de la susceptibilité magnétique est observée autour de 400°C, qui traduit une transformation de la minéralogie malgré l'atmosphère neutre imposée par l'argon lors des mesures. Cette transformation est moins remarquable dans les échantillons de La Palisse (*Figure 5- 15*), ce qui indique une légère différence de minéralogie magnétique entre les échantillons de la coulée de La Palisse et ceux de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier, dont l'altération peut être plus avancée car plus ancienne. Afin de vérifier la réversibilité des courbes autour de la température de Curie, des courbes thermomagnétiques ont été réalisées jusqu'à 250 °C (*Figure 5- 20b-g*). Pour tous les échantillons issus du prisme de Saint-Arcons-d'Allier, les courbes sont réversibles avec une température de Curie de 140°C, qui correspond à de la titanomagnétite riche en Ti.

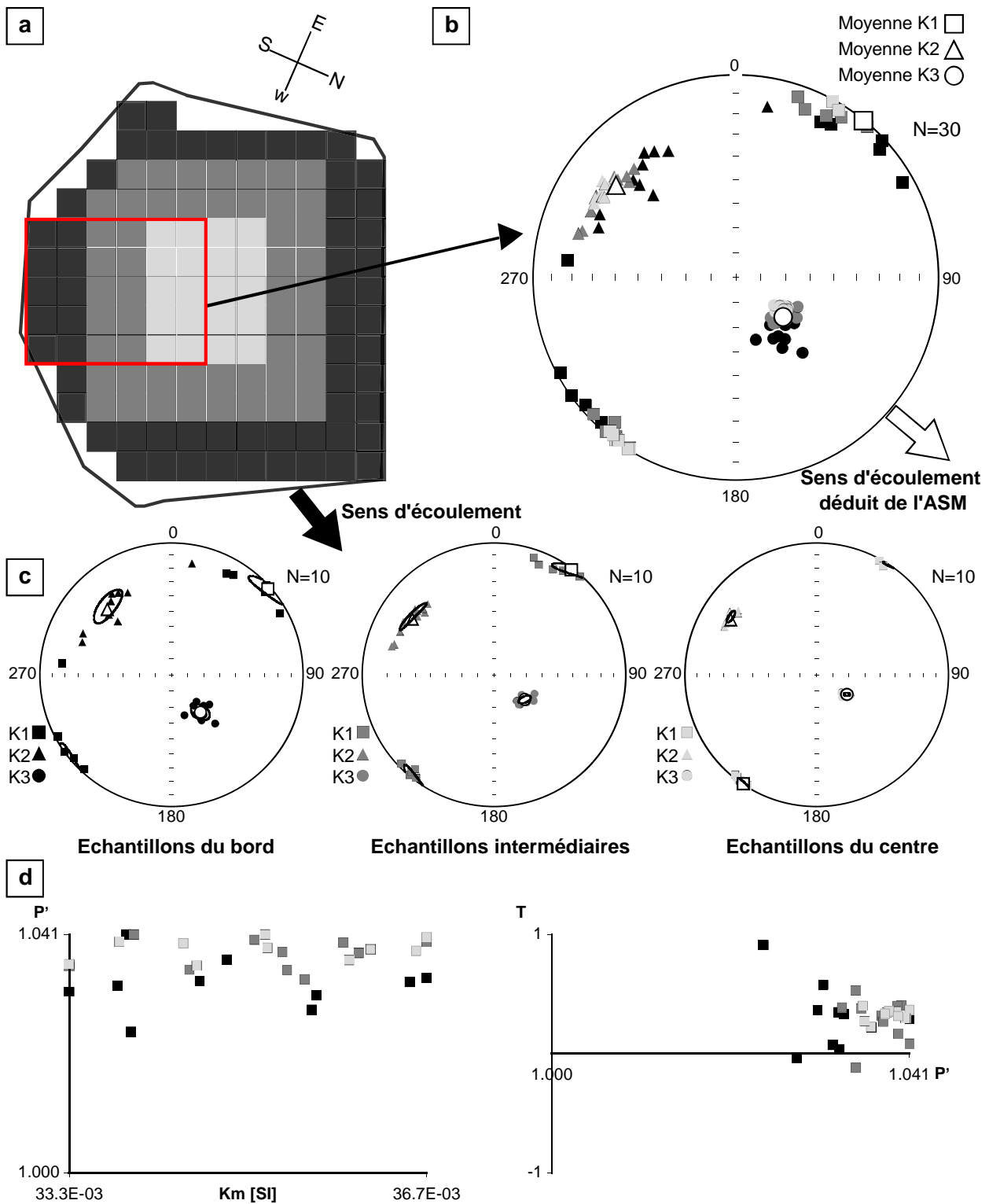


Figure 5- 17 : Fabriques magnétiques du prisme de La Palisse pour (a) les échantillons inclus dans le rectangle rouge du bord du prisme (noir) vers le centre (gris clair) et des échantillons intermédiaires (gris foncé) ; la flèche noire correspond au sens d'écoulement de la lave déduit de la carte géologique, prisme en vue du dessous. (b) la fabrique magnétique globale des tous les échantillons avec les axes principaux moyens  $K_1$  (carré blanc),  $K_2$  (triangle blanc) et  $K_3$  (cercle blanc) ; la flèche blanche correspond au sens d'écoulement déduit de l'ASM. (c) les trois fabriques magnétiques pour les échantillons du bord, intermédiaires et du centre du prisme. (d) le degré d'anisotropie  $P'$  en fonction de la susceptibilité moyenne  $K_m$  et le paramètre de forme  $T$  (Jelinek, 1981) en fonction de  $P'$  pour les échantillons du bord (noir), intermédiaires (gris foncé) et du centre (gris clair) du prisme.

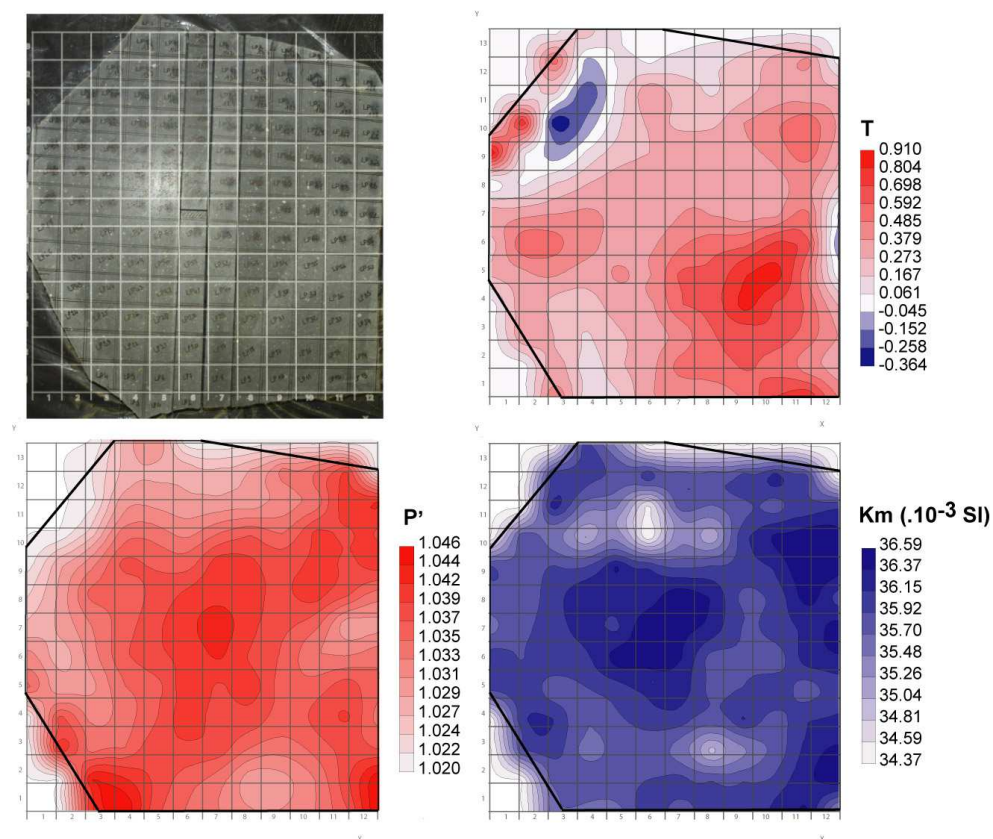


Figure 5- 18 : Carte de distribution en courbes d'isovaleur des paramètres d'anisotropie ( $P'$ ,  $K_m$  et  $T$ ) des échantillons issu du prisme de La Palisse.

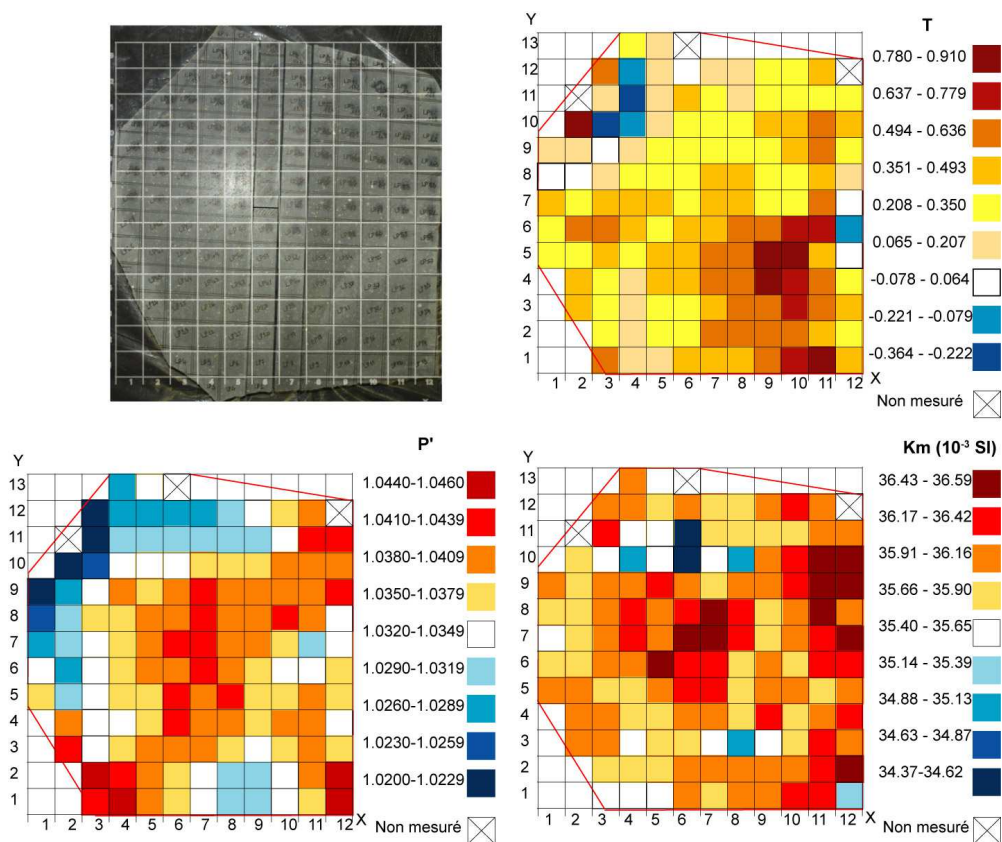


Figure 5- 19 : Carte de distribution des paramètres du degré d'anisotropie  $P'$ , de la susceptibilité moyenne  $K_m$  et du paramètre de forme  $T$  des échantillons issu du prisme de La Palisse sous format de carte « mosaïque ».

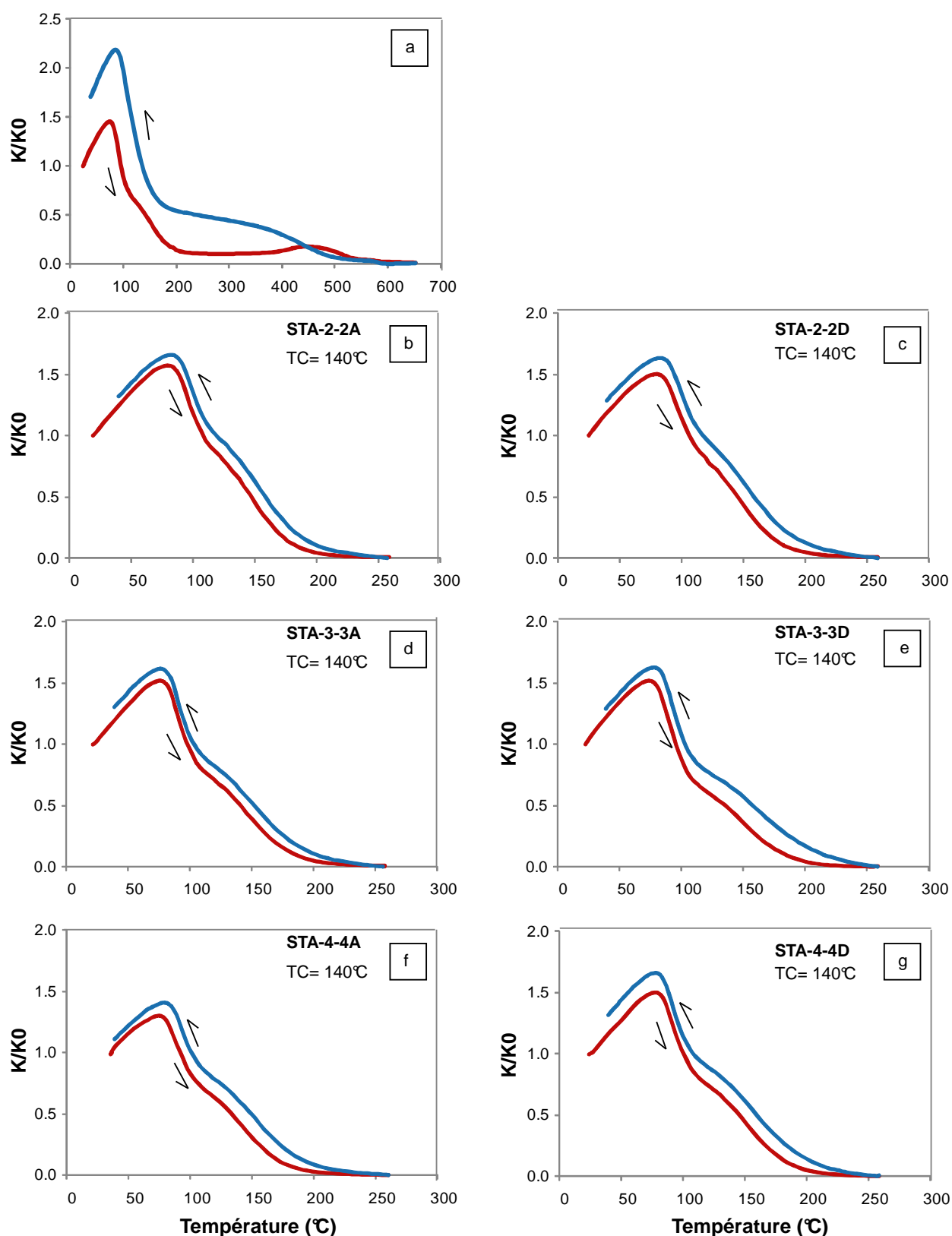


Figure 5- 20 : Courbe susceptibilité magnétique normalisée à  $K_0$  en fonction de la température des échantillons du prisme de la coulée de Saint-Arcons-d'Allier. (a) courbe thermomagnétique représentative des échantillons de Saint-Arcons-d'Allier jusqu'à 700°C. Les courbes thermomagnétiques des échantillons issus du sommet de prisme (b et c), du milieu (d et e) et de la base (f et g) sont présentées. Les échantillons nommés A sont issus du bord du prisme et D du centre.

L'anisotropie de susceptibilité magnétique a été mesurée sur 68 cubes provenant du prisme de Saint-Arcons-d'Allier. Dans le but de comparer les fabriques magnétiques entre le bord et le centre du prisme, nous avons sélectionné, comme pour le prisme de La Palisse, un même nombre d'échantillons (6 cubes) issus du bord vers le centre du prisme (*Figure 5- 21b*), ce qui nous donne une première rangée au bord, une seconde rangée nommée intermédiaire 1, une troisième rangée nommée intermédiaires 2 et enfin une quatrième rangée au centre du prisme (*Figure 5- 21a*). Les orientations préférentielles des axes de susceptibilité magnétique d'une zone à l'autre du prisme de Saint-Arcons-d'Allier sont plus aléatoires que dans le prisme de la Palisse. Sur chacune des projections, les orientations des axes de susceptibilité magnétique minimum  $k_3$  sont plus regroupées avec une ellipse de confiance plus restreinte, comme observé pour le prisme de La Palisse. Les paramètres d'anisotropie ( $P'$ ,  $K_m$  et  $T$ ) présentent des variations difficilement corrélables à l'emplacement des échantillons dans le prisme (*Figure 5- 21d*). La distribution de ces paramètres sur l'ensemble du prisme, présentée sous forme de carte en courbes d'isovaleur (*Figure 5- 22*), indique que, pour le paramètre  $T$ , les valeurs qui tendent vers 1 (forme aplatie) sont préférentiellement situées aux bords du prisme alors que les valeurs qui tendent vers -1 (forme allongée) sont situées au centre. Pour le degré d'anisotropie  $P'$ , la carte indique quelques zones où l'anisotropie est très élevée par rapport à l'ensemble du prisme. Ces zones sont généralement corrélables à de fortes valeurs pour la susceptibilité magnétique moyenne  $K_m$ . La comparaison de ces cartes avec courbes d'isovaleur et des cartes de type « mosaïque » (*Figure 5- 23*) nous montre que les variations sont plus difficiles à observer avec le second type de cartes du fait des écarts importants dans les valeurs des trois paramètres contrairement aux échantillons de La Palisse. La carte « mosaïque » de distribution du degré d'anisotropie  $P'$  indique que seul 4 échantillons sur les 68 mesurés possèdent des valeurs comprises entre 41,4 et 91,9 % d'anisotropie, ce qui correspond à de très hautes valeurs d'anisotropie dans les laves, et que tous les autres échantillons sont concentrés dans l'intervalle 6-41,3 % d'anisotropie (*Figure 5-22*). L'effet des 4 échantillons présentant les valeurs de  $P'$  les plus hautes est surreprésenté sur la carte en courbes d'isovaleur. Ce même constat peut être fait pour le paramètre  $K_m$ , et seule la carte en courbes d'isovaleur du paramètre de forme  $T$  semble être significative.

La comparaison des fabriques du bord vers le centre des prismes de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier nous indique des similitudes telles que l'orientation du l'axe de susceptibilité  $k_3$  qui est toujours plus concentré et plus constant en orientation que les axes  $k_1$  et  $k_2$ . Par contre, l'orientation de ces deux derniers axes est globalement similaire pour les échantillons du bord et du centre du prisme de La Palisse alors qu'elle varie fortement pour le prisme de Saint-Arcons-d'Allier. Les variations des paramètres d'anisotropie permettent également de mieux différencier les échantillons du bord de ceux du centre du prisme de La Palisse que pour les échantillons du prisme de Saint-Arcons-d'Allier.



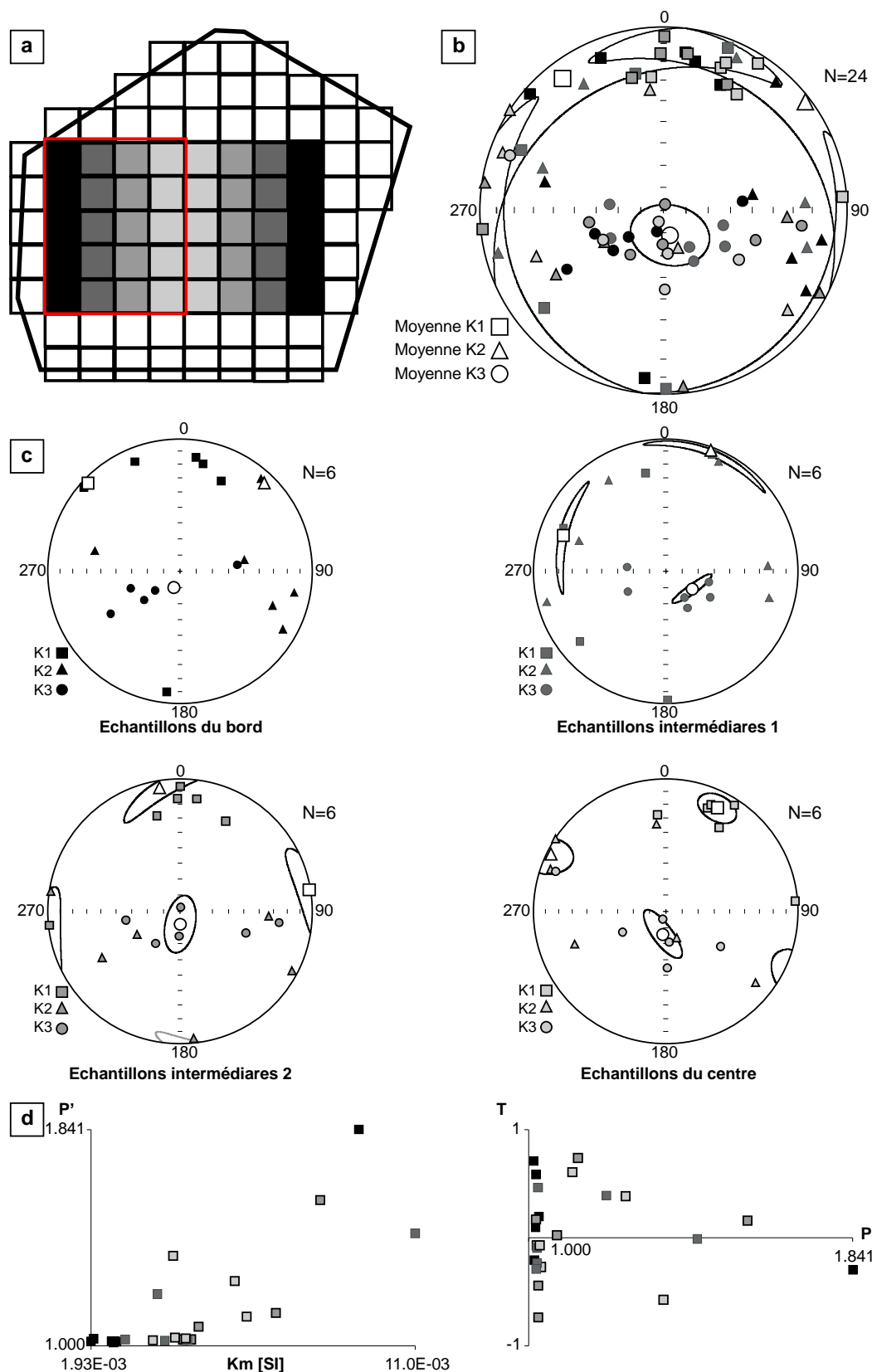


Figure 5- 21 : Fabriques magnétiques du prisme de Saint-Arcons-d'Allier pour (a) les échantillons inclus dans le rectangle rouge du bord du prisme (noir) vers le centre (gris clair) et des échantillons intermédiaires 1 et 2 (gris intermédiaires) ; (b) la fabrique magnétique de tous les échantillons avec les axes principaux  $K_1$  (carré blanc),  $K_2$  (triangle blanc) et  $K_3$  (cercle blanc) ; (c) les fabriques magnétiques pour les échantillons du bord, intermédiaires 1 et 2 et du centre du prisme. (d) le degré d'anisotropie  $P'$  en fonction de la susceptibilité moyenne  $K_m$  et le paramètre de forme  $T$  (Jelinek, 1981) en fonction de  $P'$  pour les échantillons du bord, intermédiaires 1 et 2 et du centre du prisme.

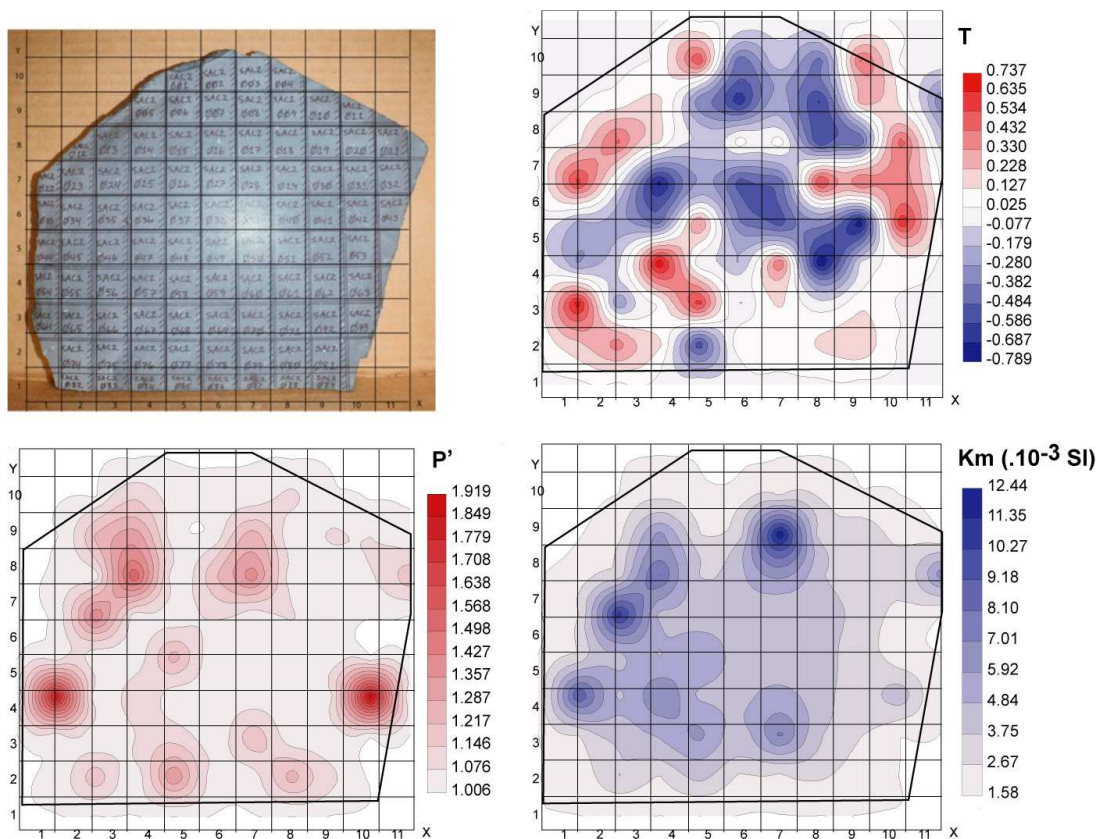


Figure 5- 22 : Carte de distribution en courbes d'isovaleur des paramètres d'anisotropie ( $P'$ ,  $K_m$  et  $T$ ) des échantillons issus du prisme de Saint-Arcons-d'Allier.

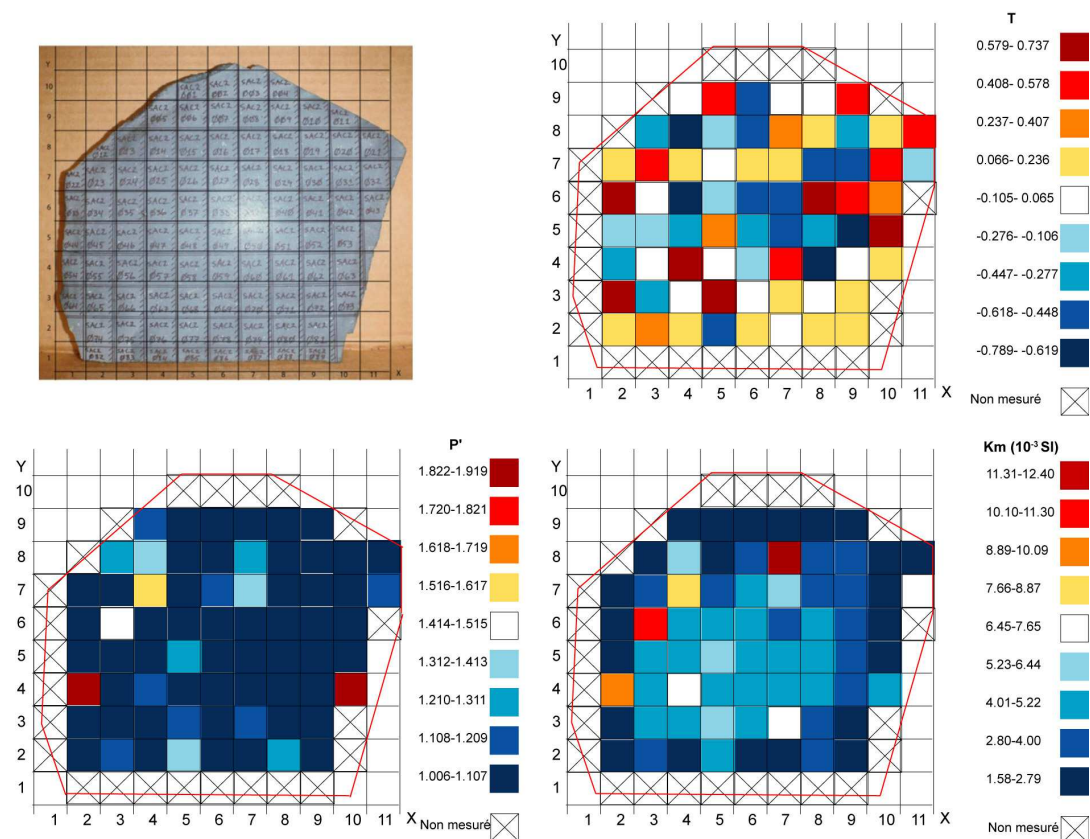


Figure 5- 23 : Carte de distribution de type « mosaïque » des paramètres du degré d'anisotropie ( $P'$ ,  $K_m$  et  $T$ ) des échantillons issus du prisme de Saint-Arcons-d'Allier.

## 1.2. Variations des paramètres d'hystérésis

Les minéraux ferromagnétiques (*s.l.*) ont, contrairement aux minéraux dia- et paramagnétiques, la capacité de conserver une aimantation spontanée (rémanente) en absence de champ magnétique appliqué. L'évolution de l'aimantation  $M$  avec le champ magnétique appliqué  $H$  est appelé cycle d'hystérésis. Le cycle d'hystérésis (*Figure 5- 24*) permet d'obtenir l'information sur plusieurs paramètres. La susceptibilité totale ( $K_0 = K_{\text{para}} + K_{\text{ferro}}$ ), déduite de la pente de la courbe au tout début du cycle d'hystérésis, et la susceptibilité des minéraux paramagnétiques ( $K_{\text{para}}$ ), obtenue par la pente lors de la saturation, permettent de calculer la susceptibilité magnétique des minéraux ferromagnétiques  $K_{\text{ferro}}$ . L'aimantation à saturation  $M_s$  correspond à un champ magnétique à saturation, au-delà duquel l'aimantation n'augmente plus. L'aimantation rémanente à saturation  $M_{rs}$  est l'aimantation résiduelle en absence de champ appliqué. Cette aimantation est annulée lorsque le champ magnétique  $H_c$  est appliqué.

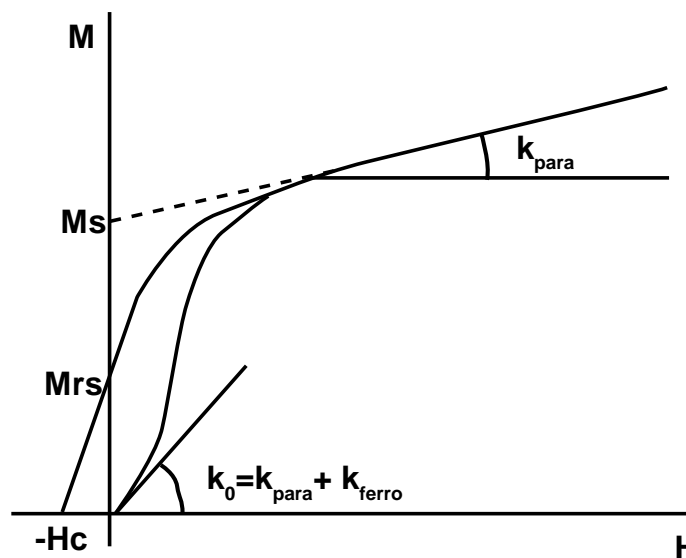


Figure 5- 24: Courbe d'hystérésis théorique des particules ferromagnétiques et les paramètres d'hystérésis.  $M_s$  est l'aimantation à saturation,  $M_{rs}$  l'aimantation rémanente à saturation,  $H_c$  le champ coercitif (Souque, 2002).

A l'échelle du grain, dans le but de minimiser l'énergie totale, la structure de l'aimantation peut changer, le cristal est alors divisé en domaines d'aimantation, appelés domaines de Weiss (Westphal & Pfaff 1986) dans lesquels la direction de l'aimantation peut varier d'un domaine à l'autre. Cette division se fait au-dessus d'une taille critique, spécifique du minéral considéré. Un grain qui comporte plusieurs domaines est appelé polydomaine (ou multi-domain MD en anglais) par opposition aux grains plus petits qui sont les monodomaines (ou single domain SD). Les murs qui séparent les différents domaines sont appelés parois de Bloch. Ces murs correspondent à un passage progressif entre deux domaines par rotations de leur spin dans le plan de séparation. Les grains polydomaines possèdent des fortes aimantations dans chaque domaine mais pour l'ensemble des domaines une aimantation faible en absence de champ appliqué. Le nombre de domaines diminue avec la taille des grains jusqu'à ce qu'il ne soit plus énergétiquement économique de créer des murs. La taille des grains polydomaines est généralement supérieure à  $15\mu\text{m}$ , et inférieure à  $0,1\mu\text{m}$  pour les

grains monodomaines dans le cas de la magnétite. Il existe aussi des grains de taille intermédiaire que l'on nomme les pseudomonodomaines (pseudo-single domain) (Souque 2002). Ce domaine reste très mal compris mais est admis à partir de données expérimentales (Day et al. 1977). Les paramètres obtenus grâce au cycle d'hystérésis sont fonction de la taille et de la nature des grains ferromagnétiques. Selon les paramètres d'hystérésis nous pouvons distinguer les polydomaines et les monodomaines car ces derniers possèdent des propriétés spécifiques comme un champ coercitif élevé, une aimantation rémanente maximale et une susceptibilité faible (Crouzet 1997). Les cycles d'hystérésis des polydomaines sont donc plus étroits que ceux des monodomaines.

Day et al (1977) proposent un diagramme pour caractériser la taille des grains de magnétite dans les roches à partir de données expérimentales. Ce diagramme se base sur les rapports  $M_{rs}/M_s$  et  $H_{cr}/H_c$ .  $M_{rs}$  et  $H_c$  diminuent avec la taille des grains et donc  $M_{rs}/M_s$  et  $H_{cr}/H_c$  montrent une relation inverse. Dunlop (2002a) développe la théorie du diagramme de Day et l'élargit aux grains de titanomagnétite en particulier pour une composition de type  $Fe_{2,4}Ti_{0,6}O_4$  (TM60). Les titanomagnétites TM60 ne présentent pas les mêmes caractéristiques que les magnétites : les écarts de coercivité et de susceptibilité sont plus importants entre les grains monodomaines et polydomaines, alors que la région de transition pseudomonodomaine est plus réduite (entre 2 et 25  $\mu m$ ) que pour les grains de magnétite, ce que Dunlop (2002) explique par le fait que la taille critique des grains monodomaines est plus importante (1 à 2  $\mu m$ ) que celle des grains de magnétite ( $d < 0,1 \mu m$ ). Toutefois les mécanismes à l'origine du pseudomonodomaine, tant pour la magnétite que pour la titanomagnétite, restent encore très mal compris.

Les paramètres d'hystérésis des échantillons du prisme de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier (*Figure 5- 25 et Figure 5- 26*) ont été mesurés sur le magnétomètre à échantillons vibrant (VSM) de l'université de l'Illinois (USA).

### 1.2.1. Le prisme de La Palisse

Les paramètres d'hystérésis du prisme de La Palisse (*Figure 5- 25*) ont été mesurés sur 143 échantillons. Les courbes d'hystérésis révèlent de faibles variations du champ coercitif  $H_c$  (de 4,474 à 6,079 mT) et du champ coercitif rémanent  $H_{cr}$  (de 9,791 à 10,710 mT) (*Figure 5- 25*). Les aimantations à saturation  $M_s$  et rémanente  $M_r$  normalisées au poids de l'échantillon présentent des variations plus importantes ( $0,595 < M_s \text{ (A.m}^2\text{/kg)} < 1,562$  ;  $0,084 < M_r \text{ (A.m}^2\text{/kg)} < 0,220$ ). L'échantillon LP1 présente le champ coercitif le plus élevé et LP8 le plus faible, l'échantillon LP130 présentent les paramètres  $M_s$  et  $M_r$  (normalisés à la masse) les plus élevés et LP39-1 les plus faibles. Les échantillons LP1, LP39-1 et LP130, bien que possédant des paramètres différents, présentent une même forme de la courbe d'hystérésis typique des grains pseudomonodomaines (Schnabl et al, 2010). Ceci contraste avec l'échantillon LP8 dont la forme se rapproche plus d'un mélange de grains ferromagnétiques et paramagnétiques (Belley et al, 2009). Cependant, les paramètres d'hystérésis restent très homogènes dans le prisme de La Palisse, ce qui est particulièrement visible à l'aide des rapports  $M_{rs}/M_s$  et  $H_{cr}/H_c$  puisque les paramètres de 140 échantillons sont regroupés dans les intervalles  $0,138 < M_{rs}/M_s < 0,143$  et  $1,681 < H_{cr}/H_c < 1,777$  (*Figure 5- 27*). Seuls 3 échantillons sortent de ce groupe : LP8, qui est le plus éloigné avec  $M_{rs}/M_s = 0,206$  et  $2,217$  et les échantillons LP47 ( $M_{rs}/M_s = 0,121$  ;  $H_{cr}/H_c = 1,717$ ) et LP39-1 ( $M_{rs}/M_s = 0,121$  ;  $H_{cr}/H_c = 1,669$ ).

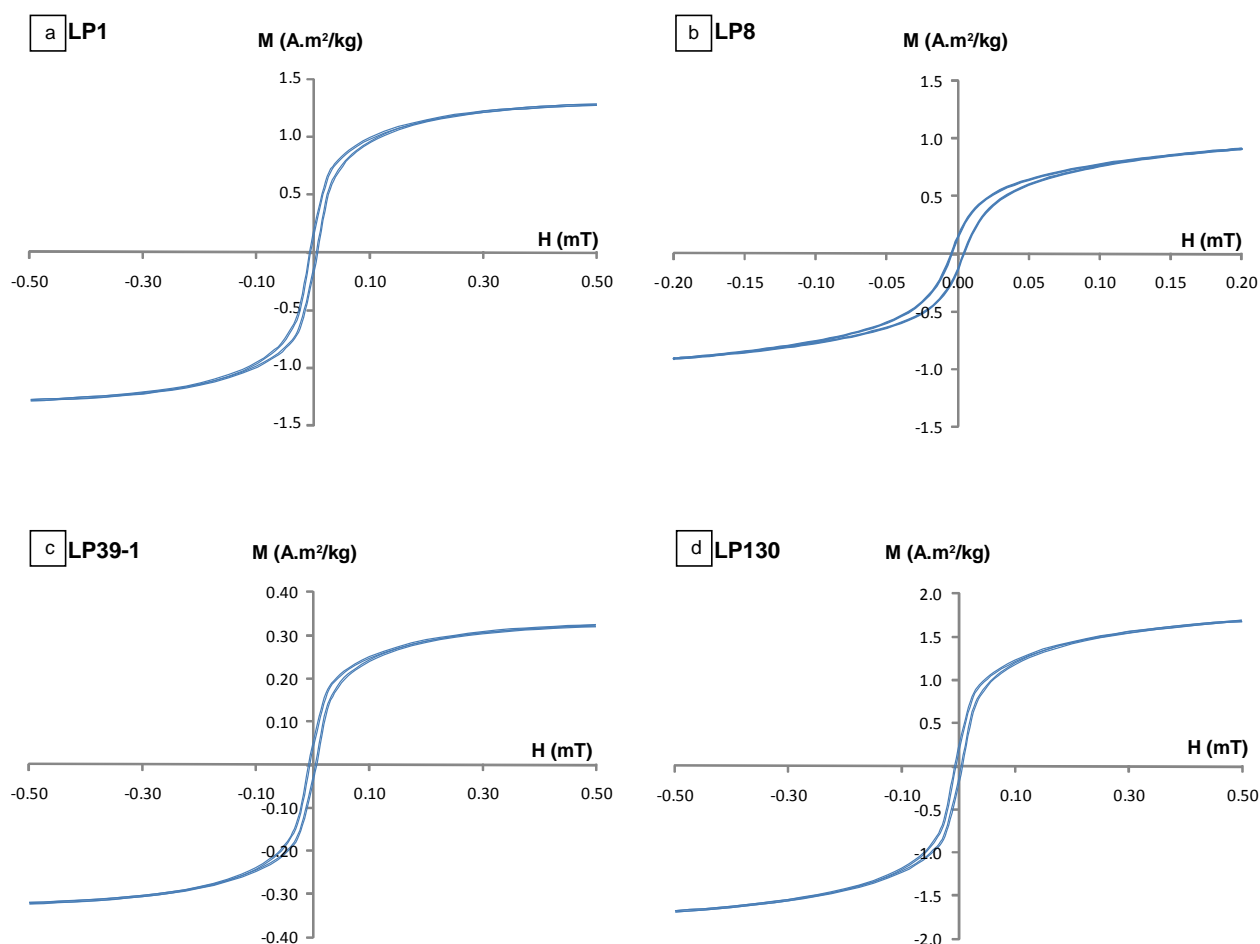


Figure 5- 25 : Cycle d'hystérésis des échantillons issus du prisme de La Palisse. (a) l'échantillon LP1 qui possède la valeur de  $H_c$  la plus élevée, (b) l'échantillon LP8 avec  $H_c$  la plus faible, (c) l'échantillon LP39-1 dont  $M_r$  et  $M_s$  sont les plus faibles, et (d) l'échantillon LP130 dont les valeurs de  $M_r$  et  $M_s$  sont les plus élevées. Seul l'échantillon LP8 présente une courbe différente des 3 autres échantillons, indiquant un mélange de minéraux ferromagnétiques et paramagnétiques, alors que les autres échantillons montrent essentiellement la présence de minéraux ferromagnétiques du pseudomonodomaine.

### 1.2.2. Le prisme de Saint-Arcons-d'Allier

Les paramètres d'hystérésis ont été mesurés pour 89 échantillons issus du prisme de Saint-Arcons-d'Allier (*Figure 5- 26a*). Les variations de champ coercitif  $H_c$  et de champ coercitif rémanent  $H_{cr}$  sont importantes, avec des gammes de 6,209 mT à 20,820 mT pour  $H_c$  et de 13,870 mT à 36,300 mT pour  $H_{cr}$ . Les variations de l'aimantation à saturation et de l'aimantation rémanente sont moins importantes que pour le prisme de La Palisse, avec  $0,146 < M_s \text{ (A.m}^2\text{/kg)} < 0,480$  et  $0,041 < M_r \text{ (A.m}^2\text{/kg)} < 0,098$ . Comme pour les échantillons du prisme de La Palisse, les cycles d'hystérésis des échantillons qui présentent les valeurs maximums et minimums des paramètres  $H_c$ ,  $M_s$  et  $M_r$  sont reportés dans la *Figure 5- 26*. L'échantillon SAC017 présente la valeur minimum de  $H_c$  et maximum de  $M_s$ , l'échantillon SAC021 possède la valeur maximum de  $H_c$  et minimum de  $M_s$ , la valeur maximum de  $M_r$  est atteinte pour l'échantillon SAC001 et la valeur minimum pour l'échantillon SAC028. Les cycles d'hystérésis de ces quatre échantillons montrent l'hétérogénéité des paramètres d'hystérésis dans le prisme de Saint-Arcons-d'Allier. Les échantillons SAC001 et SAC021 indiquent des courbes semblables avec un rétrécissement à l'origine du diagramme, plus prononcé pour l'échantillon SAC001. Ce type de courbe est décrit comme résultant d'un mélange de grains

pseudomonodomaines et superparamagnétiques (Schnabl et al, 2010 ; Tauxe et al, 1996). Les échantillons SAC017 et SAC028 présentent quant à eux des courbes indiquant des grains de type pseudomonodomaines.

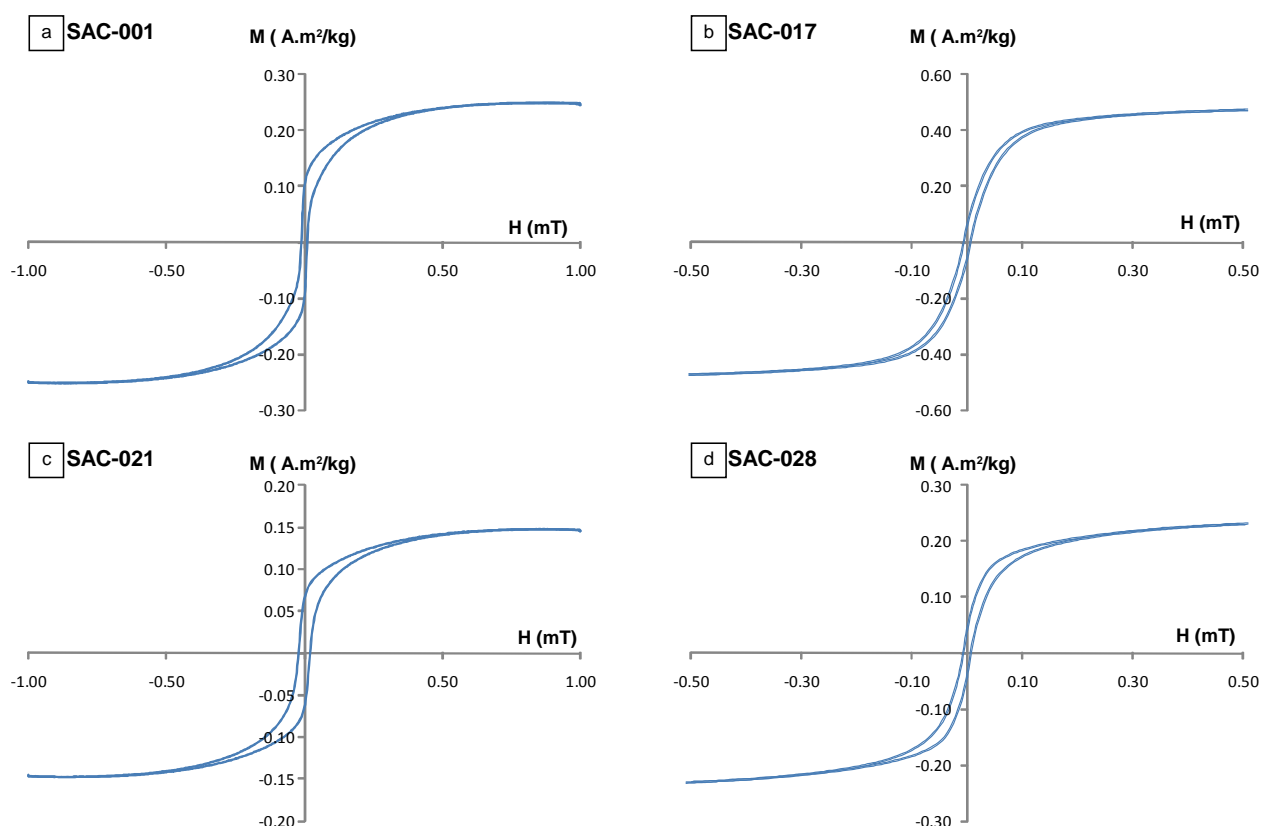


Figure 5- 26 : Courbes d'hystérésis des échantillons issus du prisme de Saint-Arcons-d'Allier. (a) l'échantillon SAC001 qui présente la valeur maximum de  $M_r$ , (b) l'échantillon SAC017 avec la valeur de  $H_c$  minimum, (c) l'échantillon SAC-021 avec  $H_c$  maximum et  $M_s$  minimum et (d) l'échantillon SAC028 avec  $M_r$  minimum. Ces échantillons montrent l'hétérogénéité des paramètres d'hystérésis dans le prisme de Saint-Arcons-d'Allier.

Les rapports  $H_{cr}/H_c$  et  $M_{rs}/M_r$  montrent également des variations plus importantes que pour le prisme de la Palisse avec  $1,281 < H_{cr}/H_c < 4,672$  et  $0,123 < M_{rs}/M_r < 0,440$ . Ces rapports projetés dans un diagramme type Day (Figure 5- 27) avec pour limite des domaines magnétiques (MD, PSD,SD) les valeurs définies par Dunlop 2002 pour la titanomagnétite (TM60) montrent un étalement des données dans le diagramme qui traduit l'hétérogénéité des paramètres d'hystérésis des échantillons du prisme de Saint-Arcons-d'Allier. Les échantillons SAC001 et SAC021 étant situés au bord du prisme et les échantillons SAC017 puis SAC028 s'approchant du centre du prisme, nous avons reporté la position de chaque échantillon sur le prisme (Figure 5- 27a) et dans le diagramme de Day (Figure 5- 27b). Les échantillons issus du bord du prisme et de la couronne 1 possèdent des paramètres d'hystérésis qui se rapprochent de ceux des grains monodomaines ( $M_{rs}/M_r > 0,50$  et  $H_{cr}/H_c < 2$ ). Les échantillons du bord du prisme possèdent des rapports  $H_{cr}/H_c$  variant de 1,281 à 2,046 et des rapports  $M_{rs}/M_r$  variant de 0,228 à 0,440. Les échantillons de la couronne 1 présentent des paramètres d'hystérésis de  $1,430 < H_{cr}/H_c < 2,783$  et  $0,223 < M_{rs}/M_r < 0,430$ . Les échantillons plus proches du centre présentent des caractéristiques qui tendent à se rapprocher de celles des grains polydomaines avec pour les échantillons de la couronne des paramètres d'hystérésis de  $2,472 < H_{cr}/H_c < 4,672$  et  $0,123 < M_{rs}/M_r < 0,326$ , et pour les échantillons situés autour du



centre des paramètres qui varient de  $2,515 < H_{cr}/H_c < 3,358$  et  $0,221 < M_{rs}/M_r < 0,264$ . Les paramètres d'hystérésis des échantillons issus du prisme de Saint-Arcons d'Allier projetés dans le diagramme de Day (*Figure 5- 27*) montrent clairement l'hétérogénéité de ces paramètres au sein même d'un prisme et suggèrent que les échantillons issus du bord du prisme possèdent des grains de plus petite taille dont les caractéristiques se rapprochent des grains monodomaines, alors que les échantillons proches du centre du prisme présentent des grains de taille plus importantes avec des caractéristiques plus proches des grains polydomaines. La projection de type « diagramme de Day » met ainsi en lumière un granoclassement croissant du bord au centre du prisme des grains de titanomagnétite, qui est le principal minéral ferromagnétique dans nos échantillons.

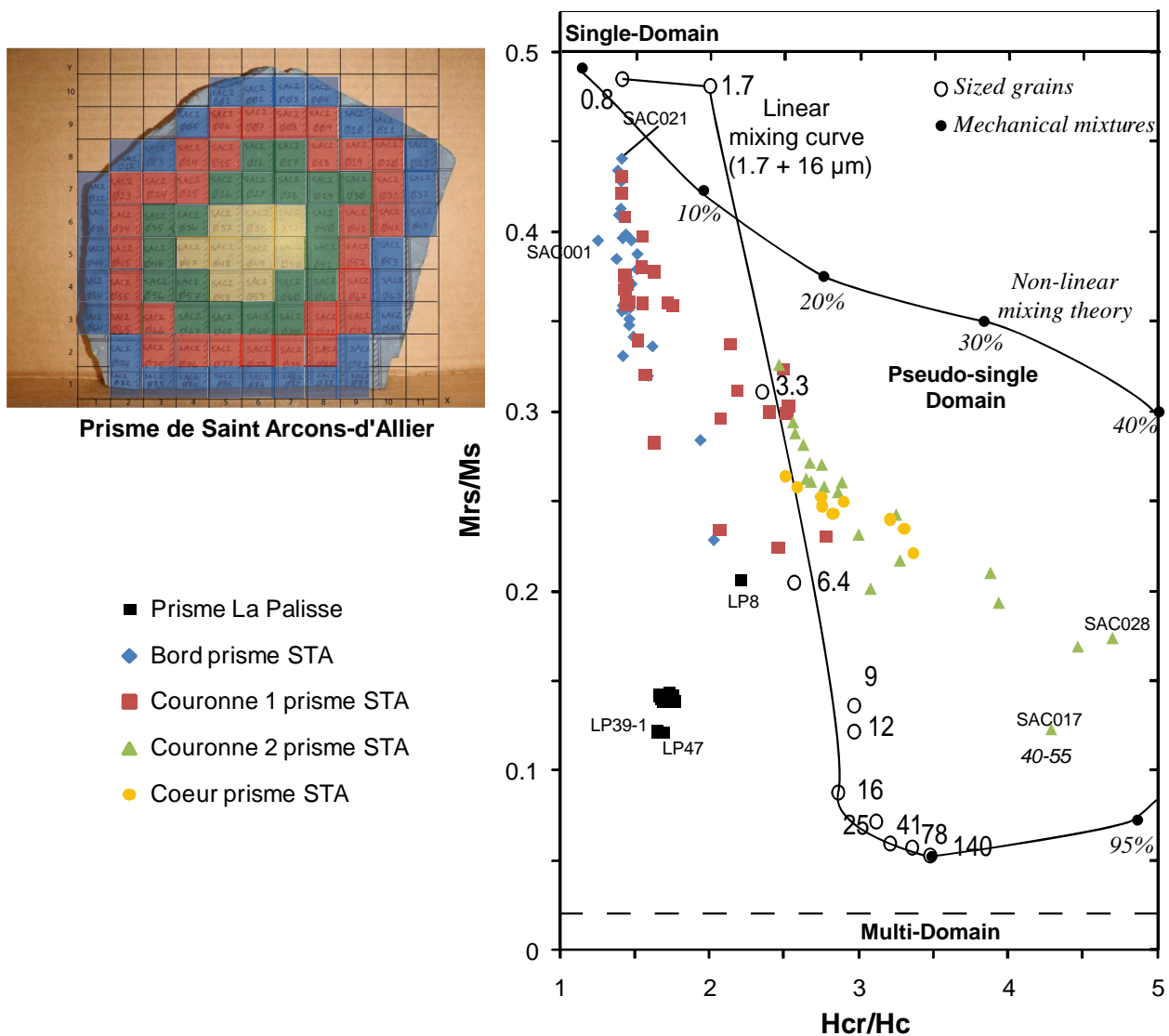


Figure 5- 27 : (a) Prisme de Saint-Arcons-d'Allier dont les couleurs correspondent à l'emplacement des échantillons dans le prisme. (b) Paramètres d'hystérésis des échantillons issus du prisme de La Palisse (noir) et de Saint-Arcons-d'Allier (couleurs) projetés dans un diagramme  $M_{rs}/M_r$  en fonction de  $H_{cr}/H_c$  (Dunlop, 2002). Les limites du pseudomonodomaine sont celles définies par Dunlop (2002) pour la titanomagnétite (TM60). Les limites verticales  $M_{rs}/M_s$  pour la titanomagnétite sont moins bien contraintes. A titre indicatif, nous avons reporté sur la figure les limites des différents domaines de la magnétite (ligne en pointillé). Les courbes de mélange (Non-linear mixing theory, Dunlop, 2002 ; Linear mixing curve, Day, 1977) sont également reportées.

### 1.3. Variations de l'anisotropie de susceptibilité magnétique et des paramètres d'hystérésis à l'échelle d'un prisme dans sa section longitudinale

Les paramètres d'anisotropie et d'hystérésis sont mesurés sur les échantillons issus d'un prisme de la colonnade dans sa section longitudinale de Saint-Arcons-d'Allier (*cf chapitre 3, Figure 3-6*), dont les études pétrographiques et géochimiques sont présentées dans le chapitre 3. Les carottes sont numérotées de 1 à la base vers 17 au sommet, et 18 et 19 pour les carottes situées plus dans la coulée, au contact de l'entablement (*Figure 5- 28*). Chaque carotte possède plusieurs spécimens, afin de comparer les spécimens du bord vers le centre du prisme. Nous présentons les paramètres d'anisotropie  $K_m$ ,  $P'$  et  $T$  pour les spécimens A, B et C, ainsi que la moyenne de ces paramètres pour l'ensemble de chaque carotte, en fonction de l'emplacement de l'échantillon dans la colonne (*Figure 5- 28*). Concernant la valeur moyenne de ces paramètres (carré rouge) pour chaque carotte, nous constatons une augmentation de la susceptibilité moyenne  $K_m$  de la base de la colonne ( $27,73 \cdot 10^{-3}$  SI) vers le sommet ( $37,26 \cdot 10^{-3}$  SI) et une chute de cette susceptibilité au contact de l'entablement ( $26,03 \cdot 10^{-3}$  SI). Le degré d'anisotropie ( $P'$ ) présente un comportement inverse avec une diminution de la base (1,028) vers le sommet (1,014) et une augmentation brusque au contact avec l'entablement (1,029). Le paramètre de forme  $T$  diminue de la base (0,71) jusqu'au milieu de la colonne (-0,34, carotte n°9) et augmente à nouveau au sommet de la colonne (0,45) pour atteindre une valeur nulle au contact de l'entablement. Cette variation du paramètre  $T$  correspond à une forme de l'ellipsoïde de susceptibilités magnétiques plutôt aplatie à la base, avec des valeurs qui tendent vers 1 (oblate), qui progressivement devient allongée vers le milieu de la colonne (prolate) pour redevenir aplatie vers le sommet de la colonne. Le paramètre  $T$  des échantillons au contact de l'entablement étant proche de 0, il présente une forme d'ellipsoïde de type sphérique. Cette observation est à pondérer par la plus grande variabilité des valeurs de  $T$  que des valeurs de  $P'$  et  $K_m$  entre spécimens d'une même carotte.

Pour observer d'éventuelles variations de ces paramètres entre le bord du prisme et le centre, nous avons également reporté les valeurs de ces paramètres pour les spécimens A (triangle vert), B (cercle mauve) et C (losange bleu) qui se situent du bord du prisme vers le centre (*Figure 5- 28*). La première observation que nous pouvons faire est que les variations des paramètres  $K_m$  et  $P'$  de la base au sommet de la colonne observées pour la valeur moyenne se retrouvent pour les spécimens A, B et C. Seul le paramètre  $T$  présente des variabilités plus importantes entre les différents spécimens A, B et C et la valeur moyenne. Les valeurs médianes de chaque paramètre indiquent que la susceptibilité moyenne  $K_m$  est plus importante pour les spécimens A ( $31,01 \cdot 10^{-3}$  SI), contre seulement  $30,68 \cdot 10^{-3}$  SI pour les spécimens B et  $30,23 \cdot 10^{-3}$  SI pour les spécimens C. Pour le degré d'anisotropie  $P'$ , les spécimens A présentent une valeur médiane de 1,021, les spécimens B de 1,017 et les spécimens C de 1,02. La valeur médiane du paramètre de forme ( $T$ ) varie de 0,320 pour les spécimens A à 0,048 pour les spécimens B avec une valeur de 0,156 pour les spécimens C. La seule variation qui semble significative entre les spécimens A, B et C, au regard des valeurs médianes et des diagrammes *Figure 5- 28*, est donc celle de la susceptibilité moyenne  $K_m$  qui est plus élevée au bord du prisme qu'au centre.

Les paramètres d'hystérésis des spécimens du bord (A) et du centre (C ou D) issus des carottes 4, 11, 14 et 17 du prisme de Saint-Arcons-d'Allier sont reportés dans un diagramme  $M_{rs}/M_r$  en

fonction de  $H_{cr}/H_c$  (Figure 5- 29a). Les données sont regroupées dans des intervalles de valeur de 0,158 à 0,171 (Mrs/Mr) et de 1,920 et 1,968 ( $H_{cr}/H_c$ ). Un zoom de ces données (Figure 5- 29b) permet d'observer que les échantillons issus de la base de la colonne (4-A, C et D) possèdent les valeurs de Mrs/Mr les plus élevées (0,171) et les valeurs de  $H_{cr}/H_c$  les plus basses (1,920). De la base au sommet de la colonne, les valeurs de Mrs/Mr diminuent (Mrs/Mr = 0,158 au sommet) et les valeurs de  $H_{cr}/H_c$  augmentent ( $H_{cr}/H_c$  = 1,968 au sommet). Ainsi les paramètres d'hystérésis permettent également de distinguer les échantillons issus de la base de la colonne de ceux du sommet. Par contre, ces paramètres ne paraissent pas distinctifs de la localisation du spécimen entre le bord et le centre du prisme (forte variabilité à l'échelle de la carotte).

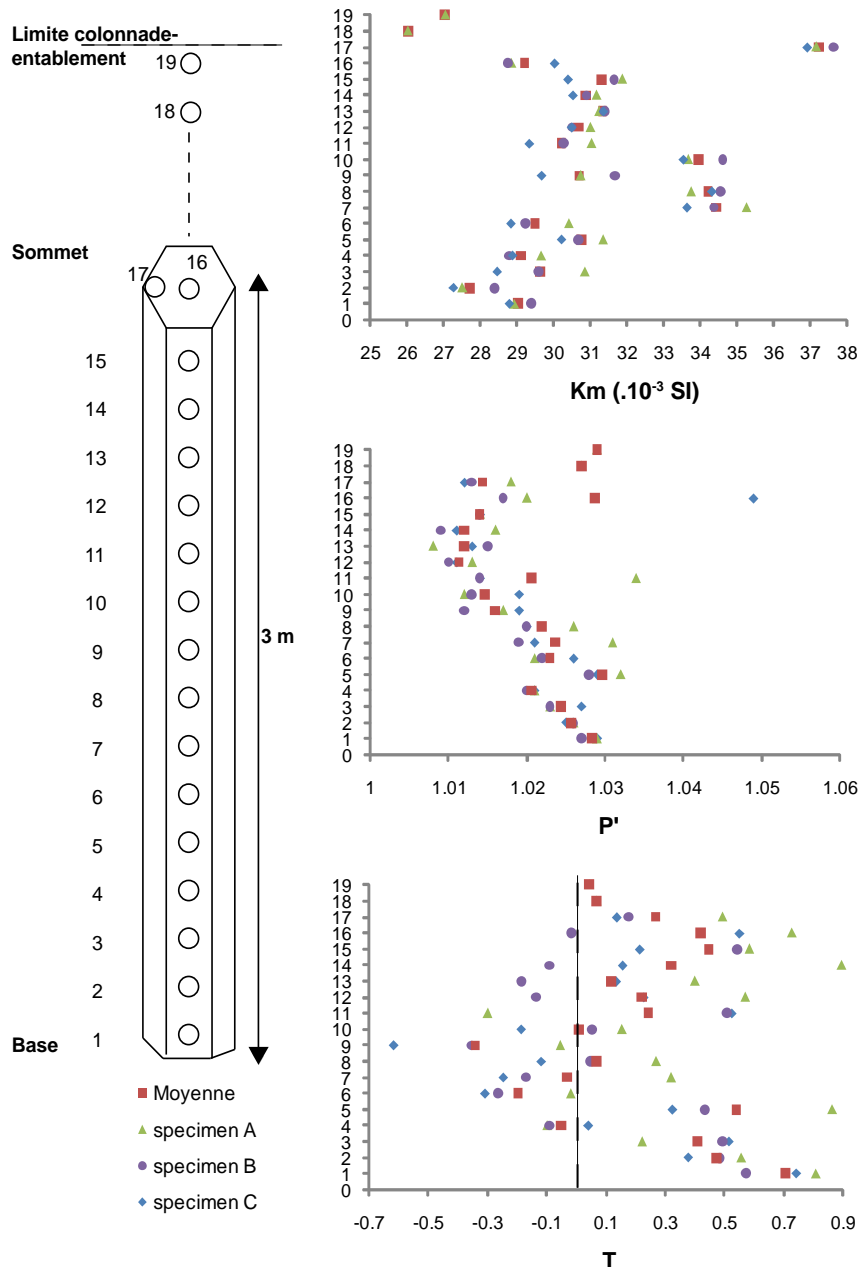


Figure 5- 28 : Susceptibilité moyenne  $K_m$ , degré d'anisotropie  $P'$  et paramètre de forme  $T$  en fonction de l'emplacement de la carotte (de la base de la colonne 1 jusqu'au au sommet 17, et au contact avec l'entablement 18 et 19). La moyenne (carré rouge) correspond à la valeur moyenne pour chaque paramètre des spécimens A, B et C issus de la carotte. Les valeurs de chaque paramètre des spécimens A (triangle vert), B (cercle mauve) et C (losange bleu) sont également indiquées.

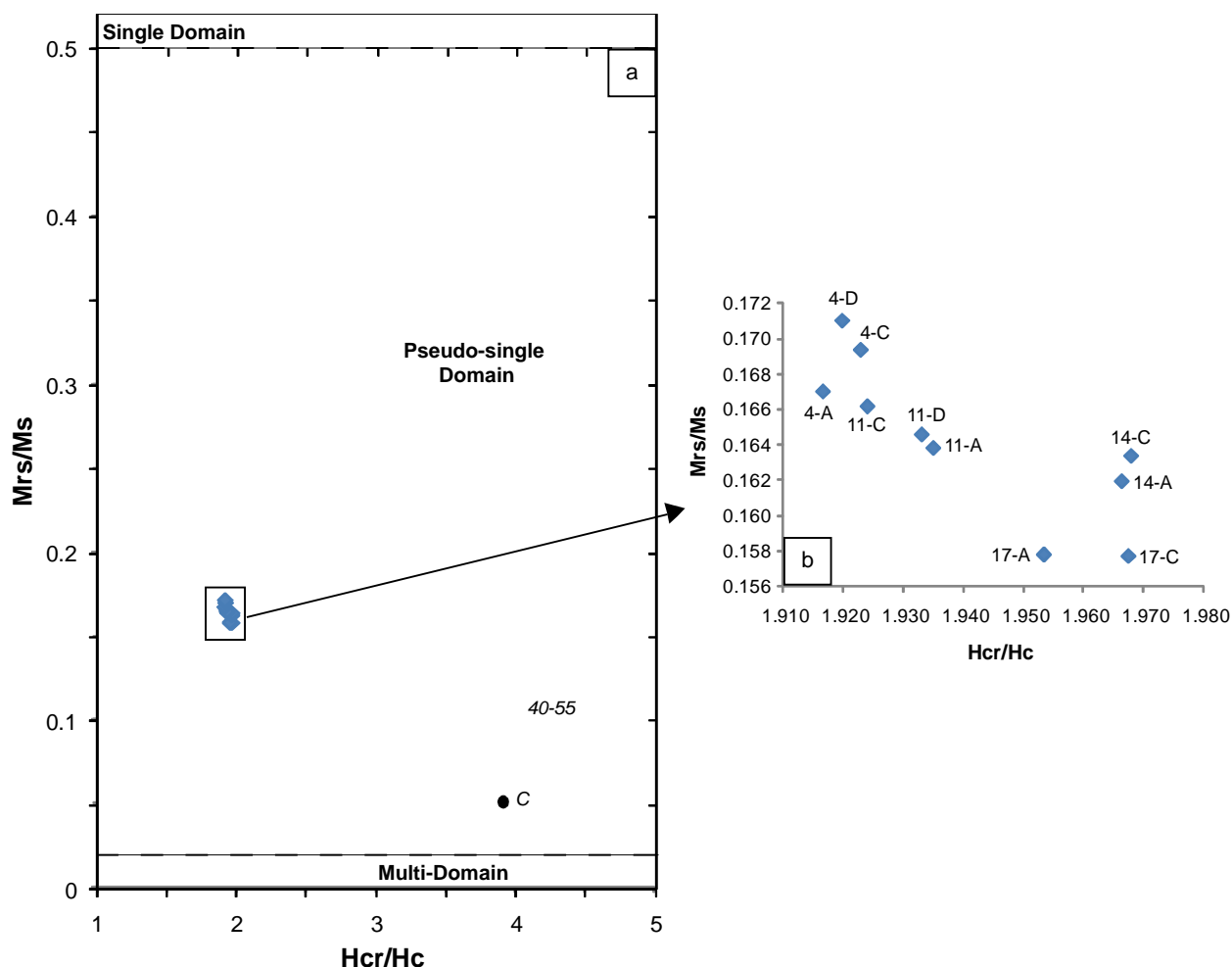


Figure 5- 29 : (a) Paramètres d'hystérésis des échantillons issus du prisme de Saint-Arcons-d'Allier projetés dans un diagramme Mrs/Mr en fonction de Hcr/Hc (Dunlop, 2002). Les limites du pseudomonodomaine sont celle définies par Dunlop (2002) pour la titanomagnétite (TM60). Les limites verticales Mrs/Ms pour la titanomagnétite sont moins bien contraintes. A titre indicatif, nous avons reporté sur la figure les limites des différents domaines de la magnétite (ligne en pointillé). (b) Agrandissement de la zone de projection des données.

## 2. Discussion

La minéralogie magnétique dans les échantillons du prisme de La Palisse est caractérisée par des grains de titanomagnétite riche en Ti, homogènes en composition et en taille. L'orientation des axes principaux de susceptibilité magnétique est également globalement semblable du bord vers le centre du prisme. Cependant, une concentration plus importante de ces axes est observée pour les échantillons situés au centre. La formation du prisme ne paraît pas perturber au premier ordre la fabrique magnétique liée à l'écoulement de la lave. Par contre, se pose la question de l'influence au second ordre de la formation de ces prismes sur la fabrique initiale.

Ellwood (1979) propose que l'orientation des axes principaux de susceptibilité magnétique soit influencée par des contraintes « thermiques » développées pendant la solidification du magma dans les prismes de dykes. Pour l'auteur, cette influence pourrait se traduire par une fabrique secondaire marquée par une concentration des axes de susceptibilité magnétique (en particulier  $k_3$ ). Dans cette hypothèse, la diminution progressive de la concentration des axes de susceptibilité magnétique du

centre vers les bords du prisme de La Palisse devrait impliquer un gradient de contraintes « thermiques », ce qui n'a pas été clairement observé dans les échantillons étudiés par Ellwood et Fisk (1977) et Ellwood (1979). Ces variations des axes de susceptibilité pourraient aussi correspondre à une déconcentration plus importante en bordure de prisme. Cette zone devrait être plus sensible à l'influence de la contraction thermique et aux effets de la fracturation à l'état solide de la coulée. Or ni les conditions thermiques ni les mécanismes à l'origine de ces modifications ne sont bien contraints. Cependant, il apparaît que l'évolution de la fabrique ne se fait pas de manière isotrope. La projection des axes  $k_1$  (*Annexe VI*) montre que la baisse de concentration s'accompagne du regroupement des axes en fonction de la géométrie du prisme, notamment en bordure. Dans les parties intermédiaires et plus centrales, la relation entre la géométrie du prisme et l'orientation des axes est moins évidente. Ceci suggère que les mécanismes mis en jeu affectent préférentiellement les parties les plus externes du prisme.

Pour les paramètres d'ASM, des variations relativement importantes sont observées au sein du prisme mais ne peuvent toutefois pas être reliées à leur géométrie. Par exemple, pour le degré d'anisotropie ( $P'$ ), une zone définie par des valeurs plus importantes est observée sur une diagonale. Cette diagonale étant perpendiculaire à la direction de l'écoulement, l'origine de cette zone pourrait être liée à l'écoulement de la lave plutôt qu'à la géométrie du prisme. Seule la susceptibilité moyenne semble indiquer des variations en fonction de l'emplacement avec des valeurs de susceptibilité légèrement plus élevées au centre qu'en bordure. De plus, les informations tirées des paramètres d'hystérésis montrent une taille de grain relativement homogène sur l'ensemble du prisme, ce qui indique que l'augmentation de susceptibilité moyenne semble correspondre à une quantité de titanomagnétite plus importante au centre.

La minéralogie magnétique dans les prismes de Saint-Arcons-d'Allier est également caractérisée par de la titanomagnétite riche en Ti homogène en composition. A la différence de ce qui est observé sur le prisme de La Palisse, les variations de susceptibilité magnétique sont plus importantes et principalement localisées à la bordure. De plus, la granulométrie magnétique indiquée par les paramètres d'hystérésis montre une hétérogénéité marquée par des grains de petite taille (monodomaine) en bordure et des grains de taille plus importante (polydomaine) vers le centre. Ces informations, en particulier la taille de grain, suggèrent un gradient thermique à l'échelle du prisme. Les paramètres d'ASM montrent une bonne correspondance entre les maximum de  $K_m$  et de  $P'$ , mais pas de correspondance évidente avec la géométrie du prisme. Le paramètre  $T$  est le paramètre qui montre la plus grande variabilité. La fabrique magnétique est plus faible que celle du prisme de La Palisse, sur l'ensemble du prisme. On observe toutefois, une meilleure concentration des axes de susceptibilité magnétique au cœur quand dans les parties les plus externes.

Pour le prisme en section longitudinale, des variations des paramètres d'ASM sont observées entre la base et le sommet. Le degré d'anisotropie  $P'$  diminue, ce qui suggère un cisaillement plus important à la base du prisme. La susceptibilité moyenne  $K_m$  montre un comportement inverse à celui du degré d'anisotropie en augmentant vers le sommet. Les paramètres d'hystérésis indiquent que la taille des grains est légèrement plus importante au sommet, ce qui peut expliquer, pour un même nombre de grains, une susceptibilité magnétique plus forte au sommet. Quant au paramètre

de forme T, ses variations sont discontinues : la valeur de T diminue de +1 à -1 de la base vers le milieu du prisme, puis augmente de -1 à +1 du milieu vers le sommet du prisme. Les variations du paramètre T ont été décrites par Parès et van der Pluijm (2003) dans des argiles faiblement déformées et reliées à une variation de l'intensité de la déformation. Au fur et à mesure que la déformation augmente, la forme de l'ellipsoïde passe de « oblate » ( $T > 0$ ) à « prolate » ( $T < 0$ ) pour revenir à oblate pour une déformation plus intense. L'analogie avec les variations observées dans la section longitudinale du prisme pourrait être menée, à condition de vérifier qu'il n'y ait pas d'influence d'autres facteurs comme la pression de la roche sus-jacente, la minéralogie magnétique ou la recristallisation qui influenceraient la forme de l'ellipsoïde.

Les données géochimiques (cf. chapitre 3) reportées pour le prisme de la section longitudinale de Saint Arcons montrent que les teneurs en MgO et Ni (comportement compatible) tendent à diminuer de la base du prisme vers le sommet alors que les teneurs en  $\text{TiO}_2$  et Sr (comportement incompatible) tendent à augmenter. Ceci nous permet de confirmer l'hypothèse évoquée dans le chapitre 3 d'une diffusion des éléments chimiques au sein de la phase vitreuse (Figure 5- 30). Cette diffusion des éléments chimiques de la base vers le sommet du prisme pourrait s'apparenter à de la différenciation, ce qui suggérerait une solidification et un refroidissement plus tardifs du sommet par rapport à la base. Le fait d'observer des grains de titanomagnétite de plus grande taille au pourrait aller dans le même sens que cette hypothèse.

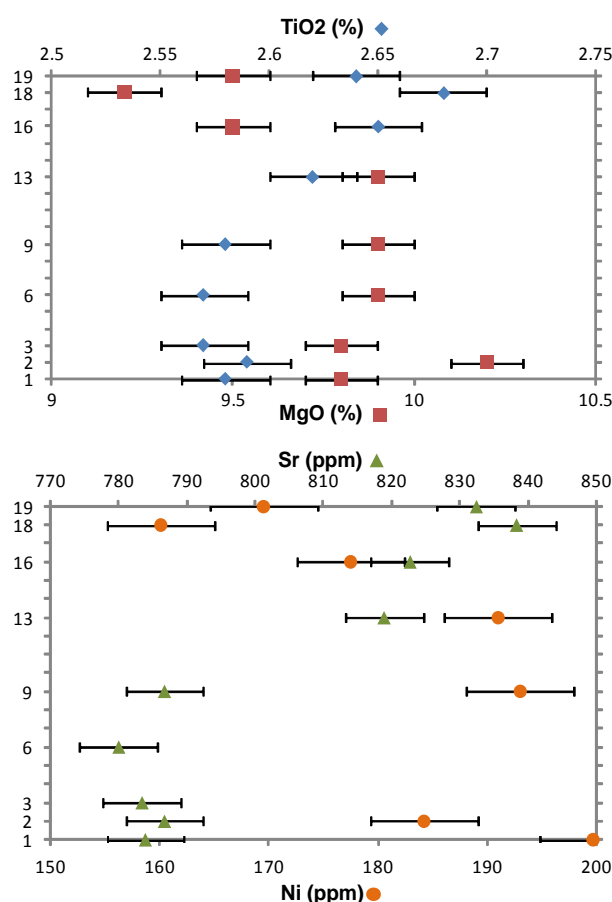


Figure 5- 30 : Variations des concentrations en éléments majeurs MgO et  $\text{TiO}_2$  (% poids) et traces Sr et Ni (ppm) de la base vers le sommet du fragment de prisme de la colonnade de Saint-Arcons-d'Allier.



## Conclusions

Les études pétrographiques entre le bord et le centre des prismes de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier ne permettent pas d'établir des caractéristiques spécifiques en fonction de leur emplacement dans le prisme. Les rubans noirs observés dans l'échantillon STA-B1 présentent une texture microvésiculée différente du reste du prisme, ce qui les rend plus fragiles. Les orientations préférentielles de réseau (OPR) des plagioclases et des clinopyroxènes mesurées dans le centre et le bord du prisme de la Palisse montrent des fabriques cristallographiques similaires avec une force de fabrique comparable. L'analyse des variations en éléments majeurs montre que peu d'éléments possèdent des variations significatives. Pour le prisme de La Palisse, seuls les éléments  $K_2O$ , dont la concentration augmente vers le centre, et  $P_2O_5$ , dont la concentration diminue vers le centre, varient significativement. Pour le prisme STA-F seul le  $MgO$  varie en augmentant vers le centre. Quant aux éléments en traces, les éléments Ni, Sr et Ba tendent à indiquer que le centre du prisme est moins différencié que les bords du prisme, en accord avec les variations en  $MgO$ . Les compositions en éléments majeurs du clinopyroxène, du plagioclase et de la titanomagnétite ne semblent pas être spécifiques aux bords ou au centre des prismes de La Palisse ou de Saint-Arcons-d'Allier. Les données en isotopes de l'hydrogène et de l'oxygène ne montrent pas de variations claires notamment pour le prisme STA-G. Les pourcentages d'eau et les variations en  $\delta D$  et  $\delta^{18}O$  indiquent que les échantillons analysés n'ont pas subi d'altération à haute ou basse température.

Les observations par analyse d'image et mesures EBSD montrent une texture d'écoulement qui contrôle les fabriques magnétiques. Ces fabriques magnétiques mettent également en évidence des effets de second ordre marqués par des variations entre le cœur et la bordure telles que celles de la concentration des axes de susceptibilité magnétique. Les fabriques magnétiques au centre des prismes reflètent mieux la fabrique globale que celles en bordure. Les paramètres d'ASM ( $P'$ ,  $K_m$ ,  $T$ ) montrent également des variations entre le cœur et la bordure des prismes, mais celles-ci ne sont pas systématiques entre les prismes de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier. Ces variations peuvent être reliées à la géométrie des prismes mais pourraient refléter également l'écoulement voire d'autres causes associées à des différences entre les deux coulées (rhéologie, intensité et régime de la déformation, épaisseur des coulées, topographie...). Nous avons peu d'éléments pour trouver l'origine de cette variabilité des signatures d'ASM. Cependant, les paramètres d'hystérésis mettent en avant des processus qui permettent une variation de la granulométrie magnétique, tels que des gradients de solidification et de refroidissement. Ces gradients pourraient également avoir une influence sur des paramètres d'ASM.



## Conclusion générale

Afin de discuter la structuration des coulées de lave, nous avons choisi d'étudier deux coulées basaltiques issues du Massif Central français (La Palisse en Ardèche et Saint-Arcons-d'Allier en Haute-Loire) qui présentent les différents niveaux de structuration qui sont décrits dans des coulées prismées : la colonnade, l'entablement et la pseudo-colonnade. La coulée de La Palisse a l'avantage d'être récente (75 ka) et d'avoir un contexte géologique connu (centre d'émission et sens d'écoulement) qui en fait un bon objet pour une étude structurale. La coulée de Saint-Arcons-d'Allier présente une colonnade bien développée et permet de cibler les études au niveau des prismes.

Les observations pétrographiques des différents niveaux de ces coulées ne se révèlent pas suffisantes pour caractériser d'éventuelles variations de texture et de minéralogie. Pour appréhender d'éventuelles variations texturales et géochimiques, nous nous sommes dirigés vers un prélèvement systématique sur l'ensemble de la coulée. Pour les analyses texturales, nous avons choisi la technique de l'anisotropie de susceptibilité magnétique (ASM) qui permet un grand nombre d'analyses. L'anisotropie magnétique des laves étant très faible, cette approche a été contrainte par des mesures d'orientations cristallographiques par analyses EBSD en un nombre restreint de points de la coulée. Pour les analyses géochimiques, la composition en éléments majeurs, traces et terres rares ainsi que la quantité d'eau et la composition en isotopes stables sur roche totale et sur minéraux ont également été obtenus dans les différents niveaux des coulées. Des variations de compositions peuvent contribuer à la discussion sur l'origine de la structuration observée. La quantité d'eau dans les différents niveaux est également un paramètre important déjà abordé dans la littérature pour expliquer l'individualisation de l'entablement (apport supposé d'eau provenant de la surface de la coulée et qui se serait infiltrée par les fractures jusqu'au centre de la coulée, Long et Wood, 1986 ; Degraff et Aydin, 1987). Les analyses isotopiques de l'hydrogène et de l'oxygène ainsi que de la quantité d'eau dans les différentes structures permettent de discuter ce point.

*A l'échelle de la coulée*, les observations pétrographiques montrent qu'il n'y a pas de différence de composition modale entre les différents niveaux. Les laves sont composées de phénocristaux d'olivine et de clinopyroxène, avec de rares xénocristaux d'olivine et de socle, quelques microphénocristaux de plagioclase et une mésostase composée de microlithes de plagioclase, clinopyroxène, oxydes (essentiellement de la titanomagnétite) et de verre. Les observations de minéraux d'altération sont rares et ceux-ci sont principalement localisés dans les bordures des prismes de Saint-Arcons-d'Allier. La composition modale est obtenue par analyse d'image (cf. chapitre 3), malheureusement cette méthode n'est pas assez précise pour permettre d'obtenir la proportion de verre dans les échantillons, et de voir son influence sur la structuration. Une texture fluidale portée par les plagioclases apparaît sur l'ensemble de la coulée sans distinction entre les niveaux.

La fabrique cristallographique du plagioclase et du clinopyroxène mesurée par la technique EBSD est bien marquée (cf. chapitre 4) et la force de fabrique ( $J_{\text{index}}$ ) du plagioclase est plus forte que celle du clinopyroxène. Les plans (010) du plagioclase tendent à être parallèles au plan d'écoulement et les pôles des plans (100) parallèles à la direction de l'écoulement. De plus il

existe une relation entre les axes cristallographiques du plagioclase et du clinopyroxène : le plan (100) du plagioclase tend à être parallèle au plan (001) du clinopyroxène, et le plan (010) du plagioclase tend à être parallèle au plan (100) du clinopyroxène. A l'inverse la titanomagnétite ne montre pas d'orientation préférentielle de réseau marquée ni de forme comme le suggère l'analyse d'image en lumière réfléchie qui montre des grains subautomorphes et de taille homogène sur l'ensemble de la coulée.

Bien qu'aucune orientation préférentielle de réseau ou de forme ne soit observée pour les grains de titanomagnétite, les mesures d'ASM permettent de révéler une fabrique magnétique qui est caractérisée par une meilleure concentration de l'axe minimum de susceptibilité magnétique ( $k_3$ ) par rapport aux axes maximum ( $k_1$ ) et intermédiaire ( $k_2$ ). Comme dans le cas des dykes (Knight and Walker, 1988, Geoffroy et al., 2002), une fabrique inverse est observée entre la base et le sommet de la coulée de la Palisse (site 2). La direction d'écoulement déterminée à partir de l'orientation du pôle de la foliation magnétique et la paléosurface est conforme à celle observée sur le terrain. La comparaison de la fabrique magnétique et cristallographique en différents points de la coulée montre que la fabrique magnétique correspond à une anisotropie de distribution des grains de titanomagnétite contrôlée essentiellement par la fabrique cristallographique des minéraux silicatés, en particulier du plagioclase.

Le bon accord entre la direction de l'écoulement déduit des mesures d'ASM et la direction d'écoulement déduite des relevés de terrain ainsi que les relations entre les fabriques cristallographiques et magnétiques confortent l'intérêt de l'utilisation de l'ASM dans les coulées basaltiques. Par contre, la fiabilité de la technique d'ASM pour la détermination du sens d'écoulement reste contrastée. Pour le site 2 de la coulée de la Palisse, le sens d'écoulement déduit des mesures d'ASM est opposé à celui attendu. Une permutation des axes  $k_1$  et  $k_3$  permettrait de retrouver un sens d'écoulement conforme à celui de la coulée de la Palisse. De telles fabriques inverses ont déjà été décrites dans la littérature et souvent attribuées à la présence de grains de petite taille, appartenant au domaine magnétique monodomaine. Or l'étude de la minéralogie magnétique ne montre pas leur présence dans les échantillons analysés. Des mesures d'anisotropie de rémanence magnétique (ARM) confirment également l'absence de ces grains. Une autre cause possible à l'origine des fabriques inverses pourrait provenir de la topographie. En effet, la paléosurface dans le site 1 et dans le site 2 de la coulée de La Palisse ne présente pas la même inclinaison : dans le premier site elle est subhorizontale alors que dans le second elle est inclinée de 50°. De nouvelles investigations concernant la relation entre fabrique magnétique et orientation de la topographie pourraient apporter des arguments dans la discussion sur l'origine des fabriques inverses.

Les paramètres d'ASM (susceptibilité moyenne  $K_m$ , degré d'anisotropie  $P'$  et paramètre de forme  $T$ ) permettent de mettre en avant des caractéristiques spécifiques de chaque niveau de la coulée. L'entablement présente des degrés d'anisotropie plus élevés que les autres niveaux et des paramètres de forme dont les valeurs sont proches de 0 (proche du cercle) alors que, dans les autres niveaux, le paramètre  $T$  montre une grande variabilité. L'entablement et la pseudo-colonnade présentent des susceptibilités moyennes plus faibles que la colonnade et la zone à

débit planaire. Des études complémentaires de l'entablement tant à l'échelle globale qu'à l'échelle des prismes que l'on y trouve permettront de mieux comprendre ces différences.

Les études géochimiques sur l'ensemble de la coulée montrent des résultats moins tranchés que l'ASM. Les variations de la composition chimique ne semblent pas significatives dans la coulées de La Palisse contrairement à la coulée de Saint-Arcons-d'Allier où des variations de composition au sein de la colonnade sont observées. Les éléments les plus incompatibles (Sr, Ba) sont légèrement plus concentrés vers le sommet de la colonnade et les éléments compatibles (Mg, Ni) plus concentrés à la base ; un tel comportement évoque celui d'une différenciation entre la base du prisme et son sommet dans la colonnade. Dans la mesure où les minéraux ne présentent pas de différences de composition entre la base et le sommet de la colonnade, on peut supposer que les variations de composition concernent le verre où ont pu migrer les éléments (cf. chapitre 3). Ces variations de composition non systématiques suggèrent une certaine variabilité, au moins quantitative, des processus affectant les différentes coulées. De nouvelles méthodes d'analyses pourraient sans doute affiner ces résultats ; de même que l'analyse in situ de la composition chimique des verres et de leur proportion.

Les mesures très précises de la quantité d'eau dans les différents niveaux des coulées montrent des teneurs globalement semblables sur l'ensemble de la coulée. Cette observation est en contradiction avec l'hypothèse de Long et Wood (1986) et de Degraff et Aydin (1987) qui stipule que l'entablement doit toujours contenir plus d'eau. De plus, les analyses de la composition en isotopes stables montrent que l'altération est quasi nulle pour les cas étudiés et que l'origine de l'eau contenue dans les roches est essentiellement magmatique, ce qui contredit l'hypothèse d'une origine météorique de l'eau sensée transiter de la surface de la coulée via les fractures vers l'entablement où elle s'accumulerait.

*A l'échelle du prisme*, les approches choisies nous permettent également de mettre en évidence des différenciations.

Les observations pétrographiques ne montrent pas de différences de composition modale entre les bords et le centre des prismes, mise à part la présence de rare minéraux secondaires en bordure des prismes de Saint-Arcons-d'Allier. Au sein de ces prismes, les rubans noirs qui peuvent être observés ne présentent pas de caractéristiques particulières si ce n'est une texture vésiculée un peu plus abondante que dans le reste du prisme.

Les mesures d'ASM montrent des différences de distributions des orientations des axes principaux de susceptibilité magnétique avec des concentrations apparemment plus fortes au centre qu'en bordure (cf. chapitre 5). Ces variations de concentration des axes de susceptibilité magnétique ne génèrent pas de modifications sensibles de l'orientation des axes de susceptibilité magnétique moyens ( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ). Ces derniers (en particulier  $K_3$ ) permettent de retrouver des directions d'écoulement conforme à celles déduites des observations de terrain. Les orientations des axes  $K_1$  présentent une variabilité en relation avec la position dans le prisme, ceci apparaît clairement dans la partie la plus externe des prismes (*Annexe VI*).



L'explication de ces variations du second ordre doit faire intervenir des processus qui viennent s'ajouter à l'écoulement. On peut invoquer l'effet d'une fracturation éventuelle des bords des prismes venant modifier la fabrique. Cette dernière hypothèse pose la question de la possibilité de désorienter les axes de susceptibilité magnétique par des fractures dans un milieu solide et pose la question du rôle des contraintes liées à la fracturation sur la minéralogie magnétique. La question de la synchronisation de la fracturation qui permettrait une organisation non aléatoire des axes  $k_1$  en fonction de l'emplacement dans le prisme (cf. chapitre 5) est également ouverte. Ces questions peuvent aussi être discutées dans la théorie de la digitation où la direction de croissance des cristaux (en particulier les minéraux magnétiques qui cristallisent en fin de solidification) est guidée par la géométrie cylindrique de la digitation.

Une autre variation marquante au niveau des prismes est celle des domaines magnétiques qui sont reliés à la granulométrie des grains magnétiques du prisme de Saint-Arcons-d'Allier. Les grains magnétiques possèdent essentiellement des paramètres d'hystérésis correspondant au domaine pseudomonodomaine (cf. chapitre 5). Cependant, les grains magnétiques situés au bord du prisme présentent des paramètres d'hystérésis plus proches du monodomaine et, progressivement, les paramètres d'hystérésis tendent vers ceux du polydomaine en allant vers le centre du prisme. Le monodomaine correspondant à des tailles de grain très petites (1 à 2  $\mu\text{m}$ ) et le polydomaine à des tailles de grains plus importantes (> 25  $\mu\text{m}$ ), nous pouvons en déduire que la taille des grains magnétiques est de plus en plus importante vers le centre du prisme de Saint-Arcons-d'Allier.

Ces variations de la granulométrie des grains magnétiques suggèrent un gradient dans la vitesse de cristallisation entre le bord et le centre du prisme. La discussion des variations de taille de grain pourrait aussi faire intervenir la théorie de la digitation par fusion de constitution (Guy et Le Coze, 1990, Guy, 2010) où la germination et donc in fine la taille des grains dépend aussi de la surfusion. Les minéraux magnétiques qui cristallisent alors en fin de solidification peuvent jouer sur la distribution de la taille des grains mais aussi impacter l'ASM puisque dans la théorie de la digitation, la géométrie des cristaux est guidée par la digitation au cours de la solidification.

On peut penser que la digitation devrait influencer également les minéraux silicatés. Or l'orientation et la force de fabrique ( $J_{\text{index}}$ ) du plagioclase associées à l'écoulement ne montrent pas de claire variation entre le centre et le bord du prisme. Notons toutefois que les données de mesure cristallographique obtenues par mesure EBSD ne couvrent pas la surface du prisme à la différence des mesures ASM.

Comme sur l'ensemble de la coulée, les variations géochimiques au sein du prisme ne sont pas systématiques. Lorsqu'elles apparaissent comme pour le prisme de Saint-Arcons-d'Allier (cf. chapitre 5), les analyses montrent des variations de concentration entre le centre et le bord avec une tendance à concentrer les éléments incompatibles vers les bords du prisme, ce qui s'approche d'une apparente différenciation magmatique à l'échelle d'un prisme, ce qui suggérerait une solidification précoce du centre du prisme par rapport au bord. Le rôle du verre

dans ces processus reste à préciser, comme nous en avons parlé plus haut à propos des variations de composition à l'échelle de la coulée.

La quantité d'eau est légèrement plus importante au bord du prisme qu'au centre. Mais cette eau n'est pas d'origine externe (l'eau contenue dans la roche est essentiellement d'origine magmatique et l'altération ne joue pas un rôle très important, comme nous l'avons dit), et cela ne concorde pas avec la théorie de Budkewitsch et Robin (1994) qui proposent que la lave se refroidisse par transfert de chaleur à travers les fractures par convection de vapeur d'eau. La quantité d'eau n'est pas plus importante dans les rubans noirs qui marquent certains prismes de Saint-Arcons-d'Allier, ce qui montre que leur formation n'est pas liée à l'altération. La texture plus vésiculée de ces rubans pourrait s'apparenter à un dégazage (il doit être très faible et on peut remarquer que, si c'est le cas, il ne se marque pas par les compositions en isotopes stables). Nous pouvons mettre cette observation en parallèle avec celle notée par Guy (2010) de cercles de bulles organisés dans la section des prismes.

Cette étude a donc montré que la caractérisation des coulées de lave prismée pouvait se faire à l'aide d'une approche pluridisciplinaire appliquée à différentes tailles d'objets, et observée à plusieurs échelles et que nous pouvions corréliser ces dernières entre elles. Elle a aussi apporté des résultats nouveaux et pertinents pour la discussion sur le mécanisme de prismation et la structuration des coulées.

Nous avons mis en place une méthodologie permettant d'étudier la structuration des coulées de la lave sur l'ensemble de la coulée grâce à l'ASM couplée à des analyses ponctuelles comme les analyses EBSD. De nouvelles études portant sur la topographie des coulées permettraient de mettre en évidence les relations entre orientation de la paléosurface et les fabriques magnétiques.

Nous avons également montré que les paramètres d'ASM tels que la susceptibilité moyenne, le degré d'anisotropie et les paramètres de forme sont spécifiques des différents niveaux observés dans les coulées et en particulier l'entablement. Ces paramètres pourraient donc être utilisés dans le but de retrouver ces différents niveaux quand les structures ne sont plus visibles sur le terrain.

Enfin les études sur les variations géochimiques, quand elles sont significatives, ont montré que les différences de composition devraient concerner la partie vitreuse. D'où l'intérêt de mieux caractériser cette phase (proportion, composition chimique) afin de mieux appréhender son rôle dans la structuration des coulées de lave.

# Bibliographie

- Aiuppa, A., Allard, P., D'Allessandro, W., Michel, A., Parello, F., Treuil, M., Valenza, M., 2000. Mobility and fluxes of major, minor and trace metals during basalt weathering and groundwater transport at Mt. Etna volcano (Sicily). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(11), p.1827-1841.
- Archanjo, C., Araujo, M. & Launeau, P., 2002. Fabric of the Rio Ceará–Mirim mafic dike swarm (northeastern Brazil) determined by anisotropy of magnetic susceptibility and image analysis. *Journal of Geophysical Research*, 107(B3).
- Aubele, J.C., Crumpler, L. & Elston, W.E., 1988. Vesicle zonation and vertical structure of basalt flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 35(4), p.349-374.
- Bambier A., Berger, E., Mergoïl, J., 1985. Carte géologique de la France au 1/50000. Notice explicative de la feuille de Burzet n° 840, BRGM, Orléans.
- Bascou, J., Camps, P. & Dautria, J., 2005. Magnetic versus crystallographic fabrics in a basaltic lava flow. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 145(1-2), 119-135.
- Belley, F., Ferré, E.C., Martin-Hernandez, F., Jackson, M.J., Dyar, M.D., Catlos, E.J., 2009. The magnetic properties of natural and synthetic (Fe-x, Mg1-x)(2) SiO4 olivines. *Earth and planetary science letters*, 284(3-4), p.516-526.
- Bellon, H. & Gibert, J., 1983. Le volcanisme dispersé du Gévaudan un jalon important dans l'évolution cénozoïque du volcanisme du Massif Central français. *Géologie Méditerranéenne*, TX n°2, p.115-127.
- Bénard, H., 1900. Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide. *Rev. Gen. Sci. Pures Appl.*, 11, p.1261.
- Berger, E.T., 1973. Le volcanisme récent de l'Ardèche. Thèse de doctorat. Université de Paris-Sud.
- Berger, E.T., Brousse R., Maury R.C., 1975. Age récent (11700 +/- 270 ans BP) des dernières éruptions du Vivarais. *Comptes rendus de l'académie des sciences*, 280(4), p.419-422.
- Berger, E.T., 1981. Enclaves ultramafiques, mégacristaux et leurs basaltes-hôtes en contexte océanique (Pacifique Sud) et continental (Massif Central français). Thèse de doctorat. Université de Paris-Sud.
- Bertolo, S., Nimis, P. & Dal Negro, A., 1994. Low-Ca augite from experimental alkali basalt at 18 kbar; structural variation near the miscibility gap. *American Mineralogist*, 79(7-8), p.668-674.
- Bigeleisen, J., Perlman, M.L., Prosser, H.C., 1952. Conversion of hydrogenic materials to hydrogen for isotopic analysis. *Anal. Chem.* 24, 1356–1357.
- Boivin, P.A., 1982. Interactions entre magmas basaltiques et manteau supérieur : arguments apportés par les enclaves basiques des basaltes alcalins : exemples du Devès (Massif Central français) et du volcanisme quaternaire de la région de Carthagène (Espagne). Thèse de doctorat.
- Bonney, T.G., 1876. Columnar, fissile and spheroidal structure; *Quart. Jour, Geol. Soc. London*, 32, p.140–154.
- Borradaile, G. & Puumala, M., 1989. Synthetic magnetic fabrics in a plasticine medium. *Tectonophysics*, 164(1), p.73-78.
- Borradaile, G.J. & Henry, B., 1997. Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy. *Earth-Science Reviews*, 42(1-2), p.49-93.

- Borradaile, G.J., Jackson, M., 2004. Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS), magnetic petrofabrics of deformed rocks. In: Martín-Hernandez, F., Lünenburg, C.M., Aubourg, C., Jackson, M. (Eds.), *Magnetic Fabrics*. Geological Society of London Spec. Publ. No, 238, pp. 299-360
- Bouchez, J.-L., 2000. Magnetic susceptibility anisotropy and fabrics in granites Anisotropie de susceptibilité magnétique et fabrique des granites. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 330(1), p.1-14.
- Bourdier, J. & Cantagrel, J., 1983. Volcanism on the Monts-Dore - Cezallier Border (Massif Central of France), New chronology data. *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 25(2), p.277-280.
- Bout, P., 1960. Le Villafranchien du Velay et du bassin hydrographique moyen et supérieur de l'Allier. Thèse. Le Puy: Université de Paris.
- Bozon, P., 1963. Contribution à l'étude des formes volcaniques de l'Ardèche. *Revue de géographie alpine*, 51(4), p.591-674.
- Briot, D., 1988. Génèse d'une série alcaline intraplaque continentale : étude géochimique (éléments traces et isotopes SR-ND-O) du volcan des Monts Dore (Massif central français). Thèse Etat.
- Brown, H.C., Khan, M.A. & Stacey, F.D., 1964. A search for flow structure in columnar basalt using magnetic anisotropy measurements. *Pure and Applied Geophysics*, 57(1), p.61-65.
- Budkewitsch, P. & Robin, P., 1994. Modelling the evolution of columnar joints. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 59(3), p.219-239.
- Bulkeley, R., 1693. Part of a letter from Sir RBSRS to Dr. Lister, concerning the Giants Causway in the County of Atrim in Ireland. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 17, p.708-710.
- Bunge, H.J., 1982. Texture analysis in materials science, Butterworths London, 593 pp.
- Callot, J.P, Geoffroy, L, Aubourg, C, Pozzi, J.P, Mege, D., 2001. Magma flow directions of shallow dykes from the East Greenland volcanic margin inferred from magnetic fabric studies. *Tectonophysics*, 335(3-4), 313-329.
- Callot, J.P. & Guichet, X., 2003. Rock texture and magnetic lineation in dykes: a simple analytical model. *Tectonophysics*, 366(3-4), 207-222.
- Canon-Tapia, E., Walker, G.P.L., Herrero-Bervera, E., 1995. Magnetic fabric and flow direction in basaltic pahoehoe lava of Xitle Volcano, Mexico. *of Volcanology and Geothermal Research*, 65, 249-263.
- Cañón-Tapia, E., Walker, G.P.L & HerreroBervera, E., 1996. The internal structure of lava flows - Insights from AMS measurements .1. Near-vent a'a. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 70(1-2), 21-36.
- Cañón-Tapia, E., Walker, G.P.L & HerreroBervera, E., 1997. The internal structure of lava flows - Insights from AMS measurements .2. Hawaiian pahoehoe, toothpaste lava and 'a'(a)over-bar. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 76(1-2), 19-46.
- Cañón-Tapia, E. & Pinkerton, H., 2000. The anisotropy of magnetic susceptibility of lava flows: an experimental approach. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 98(1-4), 219-233.

- Cañón-Tapia, E., 2004. Anisotropy of magnetic susceptibility of lava flows and dykes: A historical account. *Geological Society, London, Special Publications*, 238(1), 205-225.
- Cantagrel, J. & Prévot, M., 1971. Paléomagnétisme et âge potassium-argon des basaltes du Dèvès aux environs de Saint Arcons d'Allier (Massif Central, France). *Comptes rendus de l'académie des sciences*, 273(5), p.261.
- Carbonnel, J.P Duplaix, S. & Selo, M., 1973. Sur la présence de deux épisodes magmatiques antérieurs aux basaltes du Devès: datation par trace de fission des zirons et par K-Ar des andésites d'Espaly (Haute-loire). *Comptes rendus de l'académie des sciences*, 276(1), p.5-7.
- Cebriá, J.M., Lopez-Ruiz, J., Doblas, M., Oyarzun, R., Hertogen, J., Benito, R., 2000. Geochemistry of the Quaternary alkali basalts of Garrotxa (NE Volcanic Province, Spain): a case of double enrichment of the mantle lithosphere. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 102(3-4), p.217-235.
- Chadima, M., Cajz, V. & Týcová, P., 2009. On the interpretation of normal and inverse magnetic fabric in dikes: Examples from the Eger Graben, NW Bohemian Massif. *Tectonophysics*, 466(1-2), 47-63.
- Chauvel, C. & Jahn, B.-M., 1984. Nd---Sr isotope and REE geochemistry of alkali basalts from the Massif Central, France. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(1), p.93-110.
- Clark, D.A., 1997. Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. *Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17, p.83-104.
- Clayton, R.N. & Mayeda, T.K., 1963. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 27(1), p.43-52.
- Coplen, T.B., 1988. Normalization of oxygen and hydrogen isotope data. *Chemical Geology: Isotope Geoscience section*, 72(4), p.293-297.
- Crouzet, C., 1997. Le thermo paléomagnétisme: méthodologie et applications (tectonique, thermique et géochronologie) a la zone dauphinoise interne (Alpes occidentales, France). Université de Savoie.
- Dautria, J., Liotard, J. & Briot, D., 2004. Specificities of crustal contamination in phonolites: the example of the Eastern Velay (French Massif Central). *Comptes Rendus Geosciences*, 336(11), p.971-981.
- Dauzère, C., 1907. Recherches sur la solidification. *J. Phys*, 6(1), p.892-899.
- Day, R., Fuller, M. & Schmidt, V.A., 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 13(4), 260-267.
- Defrates, J., Malone, D. & Craddock, J., 2006. Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) analysis of basalt dikes at Cathedral Cliffs, WY: implications for Heart Mountain faulting. *Journal of Structural Geology*, 28(1), 9-18.
- DeGraff, J.M. & Aydin, A., 1987. Surface morphology of columnar joints and its significance to mechanics and direction of joint growth. *Geological Society of America Bulletin*, 99(5), p.605-617.
- Degraff, J.M., Long, P.E. & Aydin, A., 1989. Use of joint-growth directions and rock textures to infer thermal regimes during solidification of basaltic lava flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 38(3-4), p.309-324.



- Degraff, J.M. & Aydin, A., 1993. Effect of Thermal Regime on Growth Increment and Spacing of Contraction Joints in Basaltic Lava. *Journal of Geophysical Research*, 98(B4).
- Dekayir, A. & El-Maataoui, M., 2002. Mineralogy and geochemistry of supergene alteration of an alkali basalt from the Middle Atlas, Morocco. *Journal of African Earth Sciences*, 32(4), p.619-633.
- Desmarest, N., 1771. Sur l'origine et la nature du basalte à grandes colonnes polygones, déterminées par l'histoire naturelle de cette pierre observée en Auvergne. *Mémoire Académie Science, Paris*, vol.87, p.705–775.
- Dragoni, M., Lanza, R. & Tallarico, A., 1997. Magnetic anisotropy produced by magma flow: Theoretical model and experimental data from Ferrar dolerite sills (Antarctica). *Geophysical Journal International*, 128(1), 230-240.
- Dunlop, D.J. & Özdemir, Ö., 1997. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers* 1er éd., Cambridge University Press.
- Dunlop, D.J., 2002a. Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr /Hc)<sub>1</sub>. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *Journal of Geophysical Research*, 107(B3).
- Ellwood, B.B. & Fisk, M.R., 1977. Anisotropy of magnetic susceptibility variations in a single icelandic columnar basalt. *Earth and Planetary Science Letters*, 35(1), p.116-122.
- Ellwood, B.B., 1979. Anisotropy of magnetic susceptibility variations in Icelandic columnar basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 42(2), p.209-212.
- Ferré, E.C. and Ameglio, L., 2000. Preserved magnetic fabrics vs. annealed microstructures in the syntectonic recrystallised George granite, South Africa. *Journal of structural geology*, 22(8), 1199-1219.
- Ferré, E.C., 2002. Theoretical models of intermediate and inverse AMS fabrics. *Geophysical Research Letters*, 29(7).
- Ferré, E., Teyssier, C., Jackson, M., Thill, J.W., Rainey, E.S.G., 2003. Magnetic susceptibility anisotropy: a new petrofabric tool in migmatites. *Journal of Geophysical Research*. 108 (B2).
- Foley, S., 1694. An Account of the Giants Causeway in the North of Ireland. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 18(212), p.170–175.
- Fouris, M., 1989. Les sites villafranchiens du Devès et les basaltes de la vallée de l'Allier: application de la méthode K-Ar. Thèse Doctorat.
- Fuente, F., 1997. A computer-controlled rotating polarizer stage for the petrographic microscope. *Computers & Geosciences*, 23(2), p.203-208.
- Fuller, R., 1938. Deuteric alteration controlled by the jointing of lavas. *American Journal of Science*, 35(207), p.161-171.
- Geoffroy, L., Callot, J.P., Aubourg, C., Moreira, M., 2002. Magnetic and plagioclase linear fabric discrepancy in dykes: a new way to define the flow vector using magnetic foliation. *Terra Nova*, 14(3), 183-190.
- Gesner, K., 1565. *De omni rerum fossilium genere*. Zurich: excudebat Iacobus Gesnerus.,

- Gil-Imaz, A. et al., 2006. Magma flow and thermal contraction fabric in tabular intrusions inferred from AMS analysis. A case study in a late-Variscan folded sill of the Albarracin Massif (southeastern Iberian Chain, Spain). *Journal of Structural Geology* 28(4), p.641-653.
- Gilman, J.J., 2009. Basalt columns: Large scale constitutional supercooling? *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 184(3-4), p.347-350.
- Goehring, L. & Morris, S.W., 2008. Scaling of columnar joints in basalt. *Journal of Geophysical Research*, 113(B10).
- Grégoire, V., de Saint Blanquat, M.D., Nédélec, A., Bouchez, J.L., 1995. Shape anisotropy versus magnetic interactions of magnetite grains: Experiments and application to AMS in granitic rocks. *Geophysical Research Letters*, 22(20), 2765–2768.
- Grégoire, V. de Saint Blanquat, M., Nédélec, A., Bouchez, J., 1998. Magnetite grain shape fabric and distribution anisotropy vs rock magnetic fabric: a three-dimensional case study. *Journal of Structural Geology*, 20(7), 937-944.
- Grossenbacher, K.A. & McDuffie, S.M., 1995. Conductive cooling of lava: columnar joint diameter and stria width as functions of cooling rate and thermal gradient. *Journal of volcanology and geothermal research*, 69(1-2), p.95–103.
- Guérin, G. & Gillot, P., 2007. Nouveaux éléments de chronologie du volcanisme Pléistocène du bas Vivarais (Ardèche, France) par thermoluminescence. *Comptes Rendus Geosciences*, 339(1), 40-49.
- Guy, B. & Lecoze, J., 1990. Reflections on columnar-jointing of basalts - the instability of the planar solidification front. *Comptes rendus de l'académie des sciences série ii*, 311(8), p.943-949.
- Guy, B., 2010. Comments on "Basalt columns: Large scale constitutional supercooling? by John Gilman (JVGR, 2009) and presentation of some new data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 194(1-3), p.69-73.
- Hargraves, R.B., Johnson, D. & Chan, C.Y., 1991. Distribution anisotropy: The cause of AMS in igneous rocks? *Geophysical Research Letters*, 18(12), 2193–2196.
- Harmon, R.S. & Hoefs, J., 1995. Oxygen isotope heterogeneity of the mantle deduced from global  $^{18}\text{O}$  systematics of basalts from different geotectonic settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 120(1), p.95-114.
- Hartstra, R., 1982. Grain-size dependance of initial susceptibility and saturation magnetization-related parameters of 4 natural magnetites in the PSD-MD range. *Geophysical journal of the Royal astronomical society*, 71(2), 477-495.
- Henry, B., Jordanova, D., Jordanova, N., Souque, C., Robion, P., 2003. Anisotropy of magnetic susceptibility of heated rocks. *Tectonophysics*, 366(3-4), 241-258.
- Henry, B., Plenier, G., and Camps, P., 2003. Post-emplacement tilting of lava flows inferred from magnetic fabric study : the example of oligocene lavas in the Jeanne d'Arc Peninsula (Kerguelen islands), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 127(1-2), 153-164.

- Herrero-Bervera, E., GPL., Cañón-Tapia, E., Garcia, M.O., 2001. Magnetic fabric and inferred flow direction of dikes, conesheets and sill swarms, Isle of Skye, Scotland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 106(3-4), 195-210.
- Hodges, 1991. Petrogenesis of the phonolitic rocks of the Velay Oriental, France. Oxford Univ.
- Hoefs, J., 2009. Stable isotope geochemistry, Springer Verlag.
- Hrouda, F., 1992. Separation of a component of tectonic deformation from a complex magnetic fabric. *Journal of Structural Geology*, 14(1), p.65-71.
- Hrouda, F., Chlupacova, M., Schulmann, K., Smid, J., Zavada, P., 2005. On the effect of lava viscosity on the magnetic fabric intensity in alkaline volcanic rocks. *Studia Geophysica et geodaetica*, 49(2), 191-212.
- Iddings, J.P., 1886. The columnar structure in the igneous rock on Orange Mountain, New Jersey. *American Journal of Science*, 131, p.321-330.
- Iddings, J.P., 1909. Igneous Rocks. Occurrence of various elements, Wiley.
- Jackson, M., 1991. Anisotropy of magnetic remanence: A brief review of mineralogical sources, physical origins, and geological applications, and comparison with susceptibility anisotropy. *Pure and Applied Geophysics*, 136(1), p.1-28.
- Jaeger, J., 1961. The cooling of irregularly shaped igneous bodies. *American Journal of Science*, 259(10), p.721-734.
- James, A., 1920. Factors producing columnar structure in lavas and its occurrence near Melbourne, Australia. *Journal of Geology*, 28(5), p.458-469.
- Jelinek, V., 1978. Statistical processing of anisotropy of magnetic susceptibility measured on groups of specimens. *Studia geophysica et geodaetica*, 22(1), 50-62.
- Jelinek, V., 1981. Characterization of the magnetic fabric of rock. *Tectonophysics*, 79(3-4), 63-67.
- Jenkins, D.R., 2009. Determination of crack spacing and penetration due to shrinkage of a solidifying layer. *International Journal of Solids and Structures*, 46(5), p.1078-1084.
- Kantha, L.H., 1980. A note on the effect of viscosity on double-diffusive processes. *Journal of Geophysical Research*, 85(B8), p.4398-4404.
- Kantha, L.H., 1981. Basalt Fingers - Origin of Columnar Joints. *Geological Magazine*, 118(3), p.251-264.
- Knight, M.D. & Walker, G.P.L., 1988. Magma Flow Directions in Dikes of the Koolau Complex, Oahu, Determined From Magnetic Fabric Studies. *Journal of Geophysical Research*, 93(B5), 4301-4319.
- Kyser, T.K. & O'Neil, J.R., 1984. Hydrogen isotope systematics of submarine basalts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(10), p.2123-2133.
- Lafeber, D., 1956. Columnar jointing and intracolumnar differentiation in basaltic rocks. *Verhandelingen. Koninklijke Nederlands Geologisch Mijnbouwkundig Genootschap*, 16, p.241-245.
- Lattard, D., Engelmann, R., Konth, A., Sauerzapf, U., 2006. Curie temperatures of synthetic titanomagnetites in the Fe-Ti-O system: Effects of composition, crystal chemistry, and thermomagnetic methods. *Journal of Geophysical research-Solid Earth*, 111 (B12).

- Launeau, P. & Robin, P.-F., 1996. Fabric analysis using the intercept method. *Tectonophysics*, 267(1-4), p.91-119.
- Launeau, P. and Cruden, A.R., 1998. Magmatic fabric mechanisms in a syenite: results of a combined anisotropy of magnetic susceptibility and image analysis study. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 103, p. 5067-5089.
- Launeau, P., 2004. Mise en évidence des écoulements magmatiques par analyse d'images 2-D des distributions 3-D d'Orientations Préférentielles de Formes". *Bulletin de la Société. Géologique de France*, 175, p. 331-350.
- Launeau, P. and Robin, P.-Y. F., 2005. Determination of fabric and strain ellipsoids from measured sectional ellipses—implementation and applications. *Journal of Structural Geology*, 27, p. 2223-2233.
- Launeau P., Archanjo C. J., Picard D., Arbaret L. & Robin P.Y., 2010. Two- and three-dimensional shape fabric analysis by the intercept method in grey levels. *Tectonophysics*, 492, p. 230-239.
- Lebas, M.J., Lemaitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27(3), p.745 -750.
- Liotard, J.M., Briot, D. & Boivin, P., 1988. Petrological and geochemical relationships between pyroxene megacrysts and associated alkali-basalts from Massif Central (France). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98(1), p.81-90.
- Lodge, R.W.D. & Lescinsky, D.T., 2009. Anisotropic stress accumulation in cooling lava flows and resulting fracture patterns: Insights from starch-water desiccation experiments. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 185(4), p.323-336.
- Long, P.E. & Wood, B.J., 1986. Structures, Textures, and Cooling Histories of Columbia River Basalt Flows. *Geological Society of America Bulletin*, 97(9), p.1144-1155.
- Loock, S., Diot, H., Van Wyk de Vries, B., Launeau, P., Merle, O., Vadeboin, F., Petronis, M., 2008. Lava flow internal structure found from AMS and textural data: An example in methodology from the Chaîne des Puys, France. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(4), 1092-1104.
- Lore, J., Gao, H.J. & Aydin, A., 2000. Viscoelastic thermal stress in cooling basalt flows. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 105(B10), p.23695-23709.
- Lyle, P. & Preston, J., 1993. Geochemistry and Volcanology of the Tertiary Basalts of the Giants Causeway Area, Northern-Ireland. *Journal of the Geological Society*, 150, p.109-120.
- Lyle, P., 2000. The eruption environment of multi-tiered columnar basalt lava flows. *Journal of the Geological Society*, 157, p.715-722.
- MacDonald, G.A. & Katsura, T., 1964. Chemical Composition of Hawaiian Lavas. *Journal of Petrology*, 5(1), p.82 -133.
- MacKenzie, W.S., Donaldson, C.H. & Guilford, C., 1995. Atlas des roches magmatiques, Masson.
- Mallet, R., 1875. On the origin and mechanism of production of the prismatic (or columnar) structure of basalt. *Philosophical Magazine*, 50, p.122–135.

- Maury & Varet, 1980. Le volcanisme tertiaire et quaternaire en France. *Géologie de la France*, (107), p.138-159.
- Maury, R.C., Brousse, R., Villemant, B., Joron, J.L., Jaffrezic, H., Treuil, M., 1980. Fractional crystallization of an alkali basalt magma-the chaîne des Puys volcanic series (French Massif Central). *Bulletin de mineralogie*, 103(2), p.250-266.
- McDonough, W.F. & Sun, S., 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3-4), p.223-253.
- Mergoïl J. & Boivin P., 1993. Le Velay. Son volcanisme et les formations associées. Notice de la carte à 1/10000. *Géologie de la France*, (3), p.3-96.
- Merle, O., 1998. Internal strain within lava flows from analogue modelling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 81(3-4), p.189-206.
- Miallier, D. Fain, J., Montret, M., Pilleyre, T., Sanzelle, S., Soumana, S., 1991. Properties of the red TL peak of quartz relevant to thermoluminescence dating. Nuclear tracks and radiation measurements, 18(1-2), p.89-94.
- Moinereau, J., 1977. Altération des matériaux basaltiques et genèse des argiles en climat tempéré humide et milieu organique. *Cahiers ORSTOM, Serie Pédologique*, 15(2), p.157-173.
- Molyneux, T., 1698. A letter containing some additional observations on the Giants Causeway in Ireland. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 20, p.209-223.
- Moon, V. & Jayawardane, J., 2004. Geomechanical and geochemical changes during early stages of weathering of Karamu Basalt, New Zealand. *Engineering Geology*, 74(1-2), p.57-72.
- Morimoto, N., 1988. Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogical Magazine*, 52, p. 535-550.
- Müller, G., 1998a. Experimental simulation of basalt columns. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 86(1-4), p.93-96.
- Müller, G., 1998b. Starch columns: Analog model for basalt columns. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 103(B7), p.15239-15253.
- Müller, G., 2001. Experimental simulation of joint morphology. *Journal of Structural Geology*, 23(1), p.45-49.
- Normand, M., 1973. Le volcanisme de la bordure sud-oriental du Devès et du plateau d'Alleyrac (Velay occidental). Paris: Université Paris 6.
- O'Reilly, J.P., 1879. Explanatory notes and discussion on the nature of the prismatic forms of a group of columnar basalts, Giant's Causeway. *Transaction of the Royal Irish Academy*, vol. 26, p.641-728.
- O'Donovan, J., Facey, D. & O'Reilly, W., 1986. The magnetization process in titanomagnetite (Fe<sub>2.4</sub>Ti<sub>0.604</sub>) in the 1-30 µm particle size range. *Geophysical journal of the Royal astronomical society*, 87(3), p.897-916.
- O'Reilly, W., 1984. Rock and mineral magnetism, Blackie Glasgow and London.
- Pares, J. & van der Pluijm, B., 2003. Magnetic fabrics and strain in pencil structures of the Knobs Formation, Valley and Ridge Province, US Appalachians. *Journal of structural geology*, 25(9), p.1349-1358.

- Park, J.K., Tanczyk, E.I. & Desbarats, A., 1988. Magnetic Fabric and Its Significance in the 1400 Ma Mealy Diabase Dykes of Labrador, Canada. *Journal of Geophysical Research*, 93(B11), p.704.
- Pastre, J., Singer, B.S, Guillon, H., Pupin, J.P, Riou, B., 2004. Chronostratigraphy of the key Upper Miocene (Lower Turolian) sequence of la Montagne d'Andance (Ardeche, France). Implications of new Ar-40/Ar-39 laser fusion and unspiked K-Ar dating of trachytic tephra and basalts. *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 175(1), p.3-10.
- Peck, D. & Minakami, T., 1968. The formation of columnar joints in the upper part of Kilauean lava lakes, Hawaii. *Geological Society of America Bulletin*, 79, p.1151-1166.
- Petronis, M., and Geissman, J., 2009. Anisotropy of magnetic susceptibility data bearing on the transport of mid-tertiary regional ignimbrites, Candelaria Hills area, West-Central Nevada. *Bulletin of Volcanology*, 71, 121-151.
- Pike, C., Roberts, A. & Verosub, K., 1999. Characterizing interactions in fine magnetic particle systems using first order reversal curves. *Journal of Applied Physics*, 85(9), 6660-6667.
- Plenier, G., Camps P., Henry B., Ildefonse B., 2005. Determination of flow directions by combining AMS and thin-section analyses: implications for Oligocene volcanism in the Kerguelen Archipelago (southern Indian Ocean). *Geophysical Journal International*, 160(1), 63-78.
- Pococke, R., 1748. An Account of the Giants Causeway in. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 45, p.124-127.
- Pococke, R., 1753. A Letter upon the Same Subject with plate, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (1683-1775), 48, p.238–238.
- Potter, D.K. & Stephenson, A., 1988. Single-domain particles in rocks and magnetic fabric analysis. *Geophysical Research Letters*, 15(10), 1097–1100.
- Pouchou, J., 2004. L'analyse EBSD: principes et applications, EDP sciences.
- Preston, F.W., 1926. A study of the rupture of glass. *Journal of the Society of Glass Technology*, 10, p.234–269.
- Radhakrishnamurty, C., Likhite, S.D., Raja, P.K.S., Sahasrabudhe, P.W., 1971. Magnetic grains in Bombay columnar basalts. *Nature*, 235, p.33-35.
- Raposo, M. & Berquo, T., 2008. Tectonic fabric revealed by AARM of the proterozoic mafic dike swarm in the Salvador city (Bahia state): Sao Francisco Craton, NE Brazil. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 167(3-4), p.179-194.
- Raspe, R.E., 1776. An account of some German volcanos, and their productions: With a new hypothesis of the prismatical basaltes, established upon facts: Being an essay of physical geography for philosophers and miners, Printed for Lockyer Davis, Holborn, printer to the Royal Society.
- Richet, P., 2003. *Guide des volcans de France*, Bélin, p. 428.
- Roberts, A.P., Pike, C.R. & Verosub, K.L., 2000. First-order reversal curve diagrams: A new tool for characterizing the magnetic properties of natural samples. *Journal of Geophysical Research*, 105(B12).



- Rochette, P., 1988. Inverse magnetic fabric in carbonate-bearing rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(2), p.229-237.
- Rochette, P., Jenatton, L., Dupuy, C., Boudier, E., Reuber, L., 1991. Diabase dikes emplacement in the Oman ophiolite: a magnetic fabric study with reference to geochemistry. *Ophiolite genesis and evolution of the oceanic lithosphere: proceedings of the Ophiolite Conference*, held in Muscat, Oman, 7-18 January 1990. p. 55.
- Rochette, P., Jackson, M. & Aubourg, C., 1992. Rock magnetism and the interpretation of anisotropy of magnetic susceptibility. *Reviews of Geophysics*, 30(3), p. 209–226.
- Rochette, P., Aubourg, C. & Perrin, M., 1999. Is this magnetic fabric normal? A review and case studies in volcanic formations. *Tectonophysics*, 307(1-2), p.219-234.
- Rochette, P., Bertrand, H., Braun, C., Berger, E., 1993. The pleistocene volcanic province of Bas-Vivarais (Ardèche, France)- propagation of En-Echelon crustal cracks. *Comptes rendus de l'académie des sciences, série II*, 316(7), p.913-920.
- Ryan, M.P. & Sammis, C.G., 1978. Cyclic Fracture Mechanisms in Cooling Basalt. *Geological Society of America Bulletin*, 89(9), p.1295-1308.
- Saliba, R. & Jagla, E.A., 2003. Analysis of columnar joint patterns from three-dimensional stress modeling. *Journal of Geophysical Research*, 108(B10), p.2476.
- Sandys, E., 1697. A true prospect of the Giant's Causeway. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 19, 233.
- Savin, S.M. & Epstein, S., 1970. The oxygen and hydrogen isotope geochemistry of ocean sediments and shales. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34(1), p.43-63.
- Schnabl, P., Novak, J.K., Cajz, V., Lang, M., Balogh, K., Chadima, M., Slechta, S., Kohout, T., Pruner, P., Ulrych, J., 2010. Magnetic properties of high-Ti basaltic rocks from the Krušné hory/Erzgebirge MTS. (Bohemia/Saxony), and their relation to mineral chemistry. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 54(1), p.77-94.
- Schwartz, A.J. & Kumar, M., 2009. Electron Backscatter Diffraction in Materials Science, Springer.
- Scrope, G.P., 1825. Considerations on Volcanos: The Probable Causes of Their Phenomena, the Laws Which Determine Their March, the Disposition of Their Products, and Their Connexion with the Present State and Past History of the Globe, Cambridge University Press (2011).
- Sheldon, N., 2003. Pedogenesis and geochemical alteration of the Picture Gorge subgroup, Columbia River Basalt, Oregon. *Geological Society of America Bulletin*, 115(11), p.1377-1387.
- Sheppard, S.M.F., Nielsen, R.L. & Taylor, H.P., 1969. Oxygen and hydrogen isotope ratios of clay minerals from porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 64(7), p.755-777.
- Smith, J. V. & Brown W. L., 1988, Feldspar Minerals. 1 Crystal Structures, Physical, Chemical and Microstructural Properties, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, pp. 828.
- Smith J. V., 2002. Structural analysis of flow-related textures in lavas. *Earth-Science Reviews*, 57, 279-297.
- Sosman, R.B., 1916. Types of prismatic structure in igneous rocks. *The Journal of Geology*, 24(3), p.215–234.

- Soule, S., Cashman, K. & Kauahikaua, J., 2004. Examining flow emplacement through the surface morphology of three rapidly emplaced, solidified lava flows, Kilauea Volcano, Hawai'i. *Bulletin of volcanology*, 66(1), p.1-14.
- Souque, C., 2002. Magnétisme structural dans les chaînes de chevauchement-plissement : développements analytiques et exemples d'utilisation dans les Corbières. Thèse doctorat.
- Spry, A., 1962. The origin of columnar jointing, particularly in basalt flows. *Journal of the Australian Geological Society*, 8, p.192-216.
- Staudigel, H., Gee, J., Tauxe, L., Varga, R.J., 1992. Shallow intrusive directions of sheeted dikes in the Troodos ophiolite: Anisotropy of magnetic susceptibility and structural data. *Geology*, 20(9), p.841-844.
- Stephenson, A., Sadikun, S. & Potter, D., 1986. A theoretical and experimental comparison of the anisotropies of magnetic susceptibility and remanence in rocks and minerals. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 84(1), p.185-200.
- Stormer J. C., 1973, Calcium zoning in olivine and its relationship to silica activity and pressure, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.37, p 1815-1821.
- Sun, S.S. & Hanson, G.N., 1975. Origin of Ross Island basanitoids and limitations upon the heterogeneity of mantle sources for alkali basalts and nephelinites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 52(2), p.77-106.
- Swanson, D.A., 1967. Yakima Basalt of the Tieton River Area, South-Central Washington. *Geological Society of America Bulletin*, 78(9), p.1077-1110.
- Symons, D., 1967. Magnetic and petrologic properties of a basalt column. *Geophysical journal of the Royal astronomical society*, 12(5), p.473.
- Tarling, D.H., Hrouda, F., 1993. The Magnetic Anisotropy of Rocks, Chapman and Hall, London, 217pp.
- Tauxe, L., Mullender, T.A.T. & Pick, T., Potbellies, wasp-waists, and superparamagnetism in magnetic hysteresis. *Journal of Geophysical Research*, 101(B1), p. 571–583.
- Taylor Jr., H.P., Turi, B. & Cundari, A., 1984. 18O/16O and chemical relationships in K-rich volcanic rocks from Australia, East Africa, Antarctica, and San Venanzo-Cupaello, Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 69(2), p.263-276.
- Thomson, J., 1882. On the jointed prismatic structure in basaltic rocks. *Transaction of the Geological Society of Glasgow*, 6, p.95-110.
- Tomkeieff, S., 1940. The basalt lavas of Giants's Causeway district of Northern Ireland. *Bulletin of Volcanology*, 2, p.89-146.
- Toramaru, A. & Matsumoto, T., 2004. Columnar joint morphology and cooling rate: A starch-water mixture experiment. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 109(B2), p.B02205.
- Urrutia-Fucugauchi, J., 1982. Magnetic anisotropy study of a columnar basalt from San Anton, Morelos, Mexico. *Bulletin of Volcanology*, 45(1), p.1-8.

- Urrutia-Fucugauchi, J., Bohnel, H. & Negendank, J., 1991. Magnetic-properties and domain state of titanomagnetite in columnar basalt from Mexico. *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, 43(3), p.189-205.
- Vennemann, T.W. & Smith, H.S., 1990. The rate and temperature of reaction of  $\text{ClF}_3$  with silicate minerals, and their relevance to oxygen isotope analysis. *Chemical Geology: Isotope Geoscience section*, 86(1), p.83-88.
- Ventura, G., De Rosa, R., Colleta, E., Mazzuoli R., (1996). Deformation patterns in a high-viscosity lava flow inferred from the crystal preferred orientation and imbrication structures: an example from Salina (Aeolian Islands, southern Tyrrhenian Sea, Italy). *Bulletin of Volcanology* 57: 555-562.
- Watt, G., 1804. Observations on basalt and on the transition from the vitreous to the stony texture. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1804, p.279–313.
- Wechsler, B.A., Lindsley, D.H. & Prewitt, C.T., 1984. Crystal structure and cation distribution in titanomagnetites ( $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$ ). *American Mineralogist*, 69(7-8), 754-770.
- Wenk, H.R., Lindsley, D., Prewitt, C.T., 1980. The average structure of An 62-66 labradorite. *American Mineralogist*, 65(1-2), 81-95.
- Westphal, M. & Pfaff, H., 1986. Paléomagnétisme et magnétisme des roches, Doin.
- Zhu, R., Shi, C. & Liu, Q., 2003. Anisotropy of magnetic susceptibility of Hannuoba basalt, northern China: Constraints on the vent position of the lava sequences. *Geophysical-Research-Letters*, 30 (2).



# Annexes



## Annexe I : Propriétés magnétiques



## Anisotropie de susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique  $k$ , mesurée en champs faible (de l'ordre du  $10^{-4}$  T) et à température ambiante, s'exprime de la façon suivante :

$$k = M/H$$

Avec  $M$  l'aimantation induite ( $A.m^{-1}$ ) et  $H$  le champ inducteur ( $A.m^{-1}$ ),  $k$  est alors la pente dans une représentation de  $M$  en fonction de  $H$  (Figure I- 1).

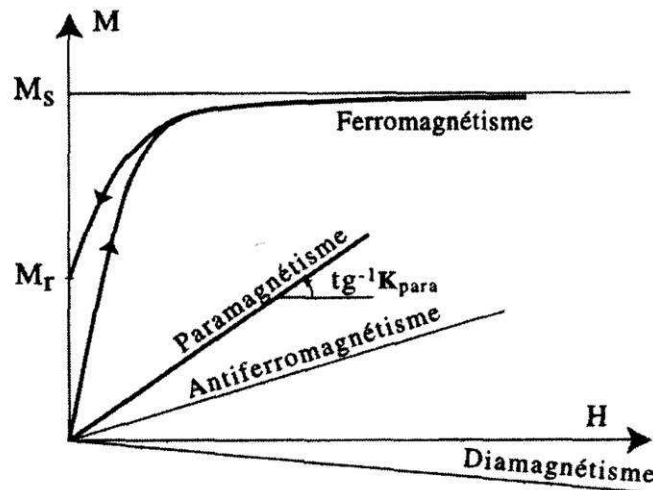


Figure I- 1 : Diagramme de l'aimantation induite  $M$  ( $A.m^{-1}$ ) en fonction du champ induction  $H$  ( $A.m^{-1}$ ) avec  $k$  la pente des courbes des principaux comportements magnétiques. Pour les ferromagnétiques,  $M_r$  est l'aimantation rémanente et  $M_s$  l'aimantation à saturation.

Dans le cas d'un corps isotrope,  $k$  est alors un scalaire, mais dans la majorité des cas, les corps étant anisotropes, la susceptibilité dépend alors de l'orientation de l'échantillon par rapport au champ inducteur. La susceptibilité devient alors un tenseur d'ordre 2, dont la représentation géométrique est un ellipsoïde d'axes principaux  $k_1 \geq k_2 \geq k_3$  (Figure I- 2). Le rapport de ces axes donne plusieurs paramètres aidant l'interprétation des données (Tableau I- 1).

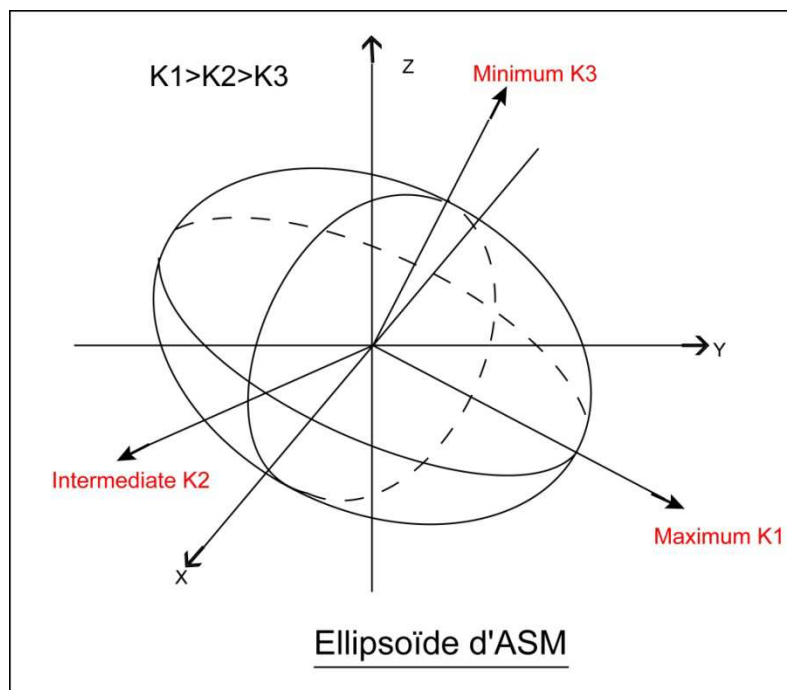


Figure I- 2 : Ellipsoïde de susceptibilité magnétique

Paramètres	Équations
La susceptibilité moyenne $k_m$	$(k_1 + k_2 + k_3)/3$
Le degré d'anisotropie P	$k_1/k_3$
La linéation L	$k_1/k_2$
La foliation F	$k_2/k_3$
Le degré d'anisotropie corrigé P'	$P' = \exp[2(\eta_2 - \eta_m)^2 + (\eta_2 - \eta_m)^2]^{1/2}$ avec $\eta_1 = \ln k_1$ , $\eta_2 = \ln k_2$ , $\eta_3 = \ln k_3$ et $\eta_m = (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3)/3$
Le paramètre de forme T	$T = (2\eta_2 - \eta_1 - \eta_3)/(\eta_1 - \eta_3)$ avec T=+1 corresponds à la forme oblate, T=-1 à prolate et T=0 à la forme neutre.

Tableau I- 1 : Listes des paramètres issues du rapport des axes principaux de l'ellipsoïde de susceptibilité magnétique.

## Autres propriétés magnétiques

Mesures	Définitions
La désaimantation par champ alternatif (AF)	Consiste à soumettre un échantillon à des champs H successivement croissants à ce jusqu'à complète disparition de l'aimantation.
Aimantation rémanente naturelle (ARN)	Enregistrement des champs magnétiques subi par la roche depuis sa formation
Aimantation rémanente isotherme (ARI)	Aimantation acquise à température donnée sous l'effet d'un champ H en général fort, supérieur au champ coercitif des grains.
Aimantation rémanente anhystérétique (ARA)	Aimantation obtenue par l'action conjointe d'un champ alternatif fort et d'un champ continu faible.
Aimantation thermorémanente (ATR)	Aimantation acquise lors que les grains magnétiques se refroidissent sous un champ magnétique H. L'ATR maximale est atteinte pour une température de blocage maximum qui correspond à la température de Curie.

## Annexe II : Analyses géochimiques sur roche totale

La Palisse

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
wt %															
SiO2	45.84	46.48	45.78	46.29	45.90	45.61	46.40	45.84	45.55	45.38	45.38	45.48	45.31	45.40	46.25
TiO2	2.39	2.38	2.37	2.41	2.41	2.39	2.42	2.42	2.41	2.38	2.39	2.38	2.38	2.34	2.38
Al2O3	14.04	14.03	13.86	14.22	14.10	13.78	14.16	13.99	13.92	13.80	13.81	13.85	13.75	13.85	14.12
Fe2O3	11.92	12.00	11.99	12.11	12.00	12.01	12.02	12.09	11.78	12.06	12.01	11.99	11.98	11.87	11.95
MnO	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
MgO	8.85	8.95	9.32	9.05	8.80	9.42	9.02	8.96	8.49	8.78	8.67	8.85	8.77	8.82	8.87
CaO	9.36	9.32	9.23	9.33	9.47	9.25	9.40	9.32	9.33	9.29	9.31	9.25	9.37	9.24	9.43
K2O	2.04	2.02	2.00	2.05	1.96	2.03	2.08	2.06	1.99	2.01	1.99	1.92	2.02	1.99	2.06
Na2O	4.67	4.61	4.63	4.60	4.47	4.40	4.66	4.62	4.60	4.52	4.52	4.52	4.41	4.40	4.47
P2O5	0.87	0.86	0.86	0.86	0.85	0.86	0.87	0.88	0.88	0.87	0.86	0.84	0.86	0.84	0.86
PF	-0.32	0.19	0.59	-0.16	-0.01	0.17	0.06	0.00	-0.11	-0.03	0.02	-0.06	0.14	-0.13	-0.12
total	100.16	100.84	100.24	101.11	100.13	99.94	101.22	100.37	99.13	99.29	99.13	99.27	99.06	98.95	100.57
ppm															
V	200.8	206.4	200.7	201.3	196.9	197	205.2	200.1	192.5	198.7	196.1	195.4	200.1	201.9	205.5
Cr	297.2	272.2	285.2	260.7	277.4	260.9	271.9	264.6	261.3	260.7	267.3	251.7	274.5	234.5	243.3
Co	50.5	92	46.7	45.8	99.2	92.8	105.6	47.8	43	47.2	45.7	43.6	44.7	44.6	44.5
Ni	190.1	172.9	188.4	167.2	184.4	191.9	165	172.6	150.4	165.2	154.5	166.2	164.6	172.5	165.8
Cu	38.6	39.6	49.9	43.8	39.3	39.4	48.7	39.9	37.2	36.5	38.1	34.3	36.4	38.9	44.6
Zn	107.4	113.5	99.8	110.6	102.7	96.8	107.2	94.9	109.7	93.9	100.3	94.6	92.4	116.7	114.4
Ga	45.2	45.8	44	45.1	45.2	42.8	45	45.3	39.7	43.1	40.2	41.6	41	26.5	29.2
Rb	61.9	60	56.4	62.6	59.6	60	63.9	57.2	55.4	63.7	50.7	56.5	62.4	56	59.7
Sr	938.3	943.5	933.2	964.4	948.7	931.8	957.9	957.2	936.8	932.5	940.4	934.4	911.5	948.7	970.5
Zr	275.1	274.3	270.2	282	275	263.9	277.7	275.3	262.4	266.8	263.7	261	259.4	269.3	273.8
Nb	101.7	101.5	100.1	102.9	103.2	97.8	100.9	100.2	96.7	98.4	98.1	98.4	97.7	100.6	103.8
Ba	772.8	758.4	773.9	789	780.5	752.2	776.9	773.6	757.9	782.2	781.9	769.6	762.3	768.7	783
Pb	8.3	0	5.2	10.1	8.1	7.3	7.1	6.6	33.6	6.8	34.6	5.7	14.5	12.2	0
Y*	24.82		24.079	23.914	24.577	28.3	25.84	24.849	29	27.2		28.3	24.038	24.651	24.959
La*	60.475		57.734	58.384	59.483	61.3	61.817	61.17	62.6	61.8		61.9	58.722	53.625	60.697
Ce*	110.92		106.74	109.99	109.68	116.5	117.48	113.56	118.5	115.3		118.9	107.32	111.46	111.47
Nd*	48.437		46.469	47.769	47.586	48.4	50.098	48.585	48.9	47.8		48.5	45.994	48.852	49.635
Sm*	9.3435		9.0403	9.4358	9.3722	10.1	9.7266	9.5706	10.4	10		10.2	9.1699	9.2932	9.1612
Eu*	2.8202		2.7177	2.7924	2.7884	2.9	2.9883	2.8975	3	2.9		2.9992	2.751	2.8638	2.8136
Gd*	7.9964		7.6603	7.4307	8.0084	8.9	8.2911	7.9316	9.1	8.8		9.1	9.2566	7.7771	7.5446
Dy*	5.6749		5.4918	5.6615	5.6291	6.1	5.8301	5.7658	6.1	6.1		6	5.4961	5.6994	5.701
Er*	3.382		0.51257	2.2056	2.388	2.8	0.0038672	-0.0073463	2.7	2.8		2.8	2.8638	2.4651	2.3683
Tb*	1.4216		1.1237	1.15	1.1955	1.4	1.125	1.1766	1.3	1.3		1.3	1.1079	1.1006	1.2083
Ym*	0.39552		0.36894	0.37448	0.3685	0.4	0.38965	0.38341	0.4	0.4		0.4	0.36159	0.39026	0.38006
Tm*	2.0091		1.9489	1.9609	2.0079	2.6	2.0508	2.0283	2.6	2.5		2.6	1.9526	2.013	2.0223
[Mg]	0.61	0.62	0.63	0.62	0.61	0.63	0.62	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
La/Yb	30.10		29.62	29.77	29.62	23.58	30.14	30.16	24.08	24.72		23.81	30.07	26.64	30.01

Analyses par fluorescence X sur pertes lourdes

\* Analyses par ICP-AES

La Palisse, colonnade

La Palisse, prisme

1	08 Tb 14B	9	08TB14D	14	07TB01
2	08 Tb 22 bot	10	08TB41B	15	07TB02
3	08 Tb 22B	11	08TB46B		
4	08 TB 45	12	08TB48B		
5	08 Tb 48 Bot	13	08TB89B		
6	08 Tb 89 Bot				
7	08 TB41 Bot				
8	08 Tb97 Bot				

La Palisse

N°	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
wt%															
SiO2	45.71	45.80	45.40	45.97	45.49	45.83	45.62	44.72	46.02	45.80	45.58	45.87	45.50	45.79	45.80
TiO2	2.36	2.36	2.34	2.37	2.37	2.38	2.36	2.35	2.38	2.41	2.41	2.40	2.41	2.41	2.42
Al2O3	13.94	14.05	13.88	14.00	13.98	14.05	13.83	13.73	14.15	14.15	14.06	14.08	13.99	14.01	14.08
Fe2O3	11.89	11.97	11.94	11.99	11.92	11.91	11.90	11.82	11.97	12.02	12.12	12.06	12.00	11.95	12.05
MnO	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.20	0.19	0.19	0.19
MgO	8.99	8.92	8.94	9.00	8.76	8.83	8.99	8.68	8.81	8.80	9.09	8.91	8.71	8.71	8.83
CaO	9.30	9.36	9.24	9.31	9.30	9.37	9.37	9.30	9.35	9.38	9.38	9.38	9.34	9.25	9.35
K2O	2.03	2.05	2.03	2.06	2.03	2.04	1.96	1.88	2.03	2.11	1.98	2.08	2.06	2.08	2.01
Na2O	4.41	4.45	4.49	4.47	4.46	4.45	4.34	4.14	4.54	4.63	4.36	4.56	4.64	4.68	4.68
P2O5	0.84	0.84	0.85	0.85	0.84	0.85	0.86	0.88	0.87	0.90	0.88	0.88	0.87	0.88	0.87
PF	-0.15	-0.14	-0.13	-0.19	-0.21	-0.21	-0.23	0.09	-0.15	-0.08	0.11	0.27	0.38	-0.04	0.88
total	99.65	99.98	99.31	100.22	99.33	99.90	99.40	97.68	100.30	100.39	100.05	100.41	99.70	99.95	100.29
ppm															
V	202.7	205.6	201.4	203.5	205.1	207.3	205.2	206.1	205.2	203	205	203.4	200.2	202.4	202.5
Cr	257.4	241.2	238.8	237	248.1	241.4	263.2	247	236.2	270.6	282.5	260.6	354.2	273.3	277.7
Co	45.9	44.7	44.2	44	47.8	42.5	46.4	43.7	47	70.8	96.6	92.6	85.7	45.4	96
Ni	266.7	201.6	184.3	179.5	181	183.6	190.8	178.5	171.9	167.4	198.7	180.6	384.4	189.2	185.4
Cu	39.2	44.2	37.2	41.3	35.6	42.6	31.6	28.6	43.8	41.9	39.6	41	39.2	35.2	36.2
Zn	110.9	115.3	109.8	112.9	112.9	111.5	106.8	107.4	109.1	103.2	122.8	101.1	103.1	122.2	100.7
Ga	28.3	28.8	27.5	28.1	27.2	26.2	24	23.4	26.9	45.4	45.7	47	42.7	44.4	43.4
Rb	58.4	63.9	54.4	53	47	57.7	55.3	47.9	59.9	58.4	59.6	62.5	58.6	64	64.1
Sr	957.3	962.7	953.7	967.4	962.3	957.5	944.6	939.9	970.1	962.7	960.2	967.5	948.8	950.4	957.2
Zr	269.9	273	269	274.7	272.6	269.3	264.7	261.6	274.3	284.3	281.7	277.9	276.4	278.2	277.8
Nb	100.9	100.6	99.5	102.1	103.9	100.6	98.2	97.7	103.2	102.8	102.1	102.2	102	102.4	102.7
Ba	780.5	778.7	753.1	762.8	787.7	778.6	782	774.3	759.8	793.4	779.5	797.5	772.1	777.6	781.9
Pb	0	3	2.6	5.3	2.9	0	0	4	0	5.8	7.7	0	3.5	7.3	9.4
Y*	25.681	24.421	24.896	24.789	25.594	24.915	24.937	24.218	24.637	25.639	24.979	24.715	25.778	25.534	25.534
La*	61.196	61.196	62.311	60.542	62.125	59.898	60.641	61.478	62.817	61.847	60.484	61.095	62.81	60.99	60.99
Ce*	110.34	113.73	114.52	111.27	116.23	111.36	115.05	114.05	113.53	114.69	112.24	113.07	115.11	112.64	112.64
Nd*	48.729	49.938	51.084	49.633	49.528	48.649	48.74	49.987	49.274	49.652	49.434	48.932	50.305	50.777	50.777
Sm*	9.3257	9.3526	9.2905	9.2994	9.4476	9.0831	9.3512	9.1355	9.509	9.5819	9.567	9.5099	9.7484	9.8052	9.8052
Eu*	2.7781	2.8808	2.9191	2.8362	2.9488	2.8402	2.947	2.9303	2.8757	2.9326	2.8585	2.8751	2.9558	2.8628	2.8628
Gd*	7.8974	7.8227	7.8871	8.1813	7.8157	9.2799	8.2744	8.1588	7.6936	9.4077	8.5492	8.1	8.5263	7.9959	7.9959
Dy*	5.769	5.8598	5.6697	5.8087	5.8976	5.8492	6.0074	5.7743	5.9071	5.9233	5.7286	5.7778	5.8263	5.7197	5.7197
Er*	0.25513	2.4219	2.3212	2.2444	2.0269	1.5551	1.9297	2.3528	2.3715	2.9907	2.5328	2.6014	2.5579	2.4921	2.4921
Tb*	1.333	1.3394	1.2238	1.1999	2.7971	1.2092	1.0598	1.1836	1.3168	1.1092	1.169	1.1639	1.1681	1.2081	1.2081
Tm*	0.39207	0.38103	0.38734	0.38452	0.52964	0.39088	0.38822	0.38496	0.41782	0.39199	0.38675	0.37321	0.39221	0.37353	0.37353
Yb*	2.064	2.0437	2.0012	2.0644	2.0956	2.036	2.0488	2.0541	2.0315	2.047	2.0326	1.9877	2.1088	2.0661	2.0661
[Mg]	0.62	0.62	0.62	0.62	0.61	0.61	0.62	0.61	0.61	0.61	0.62	0.61	0.61	0.61	0.61
La/Yb	0.00	29.94	31.14	29.33	29.65	29.42	29.60	29.93	30.92	30.21	29.76	30.74	29.78	29.52	29.52

Analyses par florescence X sur perles lourdes

La Palisse, entablement

La Palisse, zone à débit planaire

\* Analyses par ICP-AES

16	07TB03	25	08 Tb 35
17	07TB04	26	08 Tb 36
18	07TB05	27	08 Tb 37 Bot
19	07TB06		
20	07TB07		
21	07TB08		
22	07TB09		
23	07TB10		
24	07TB11		

La Palisse

N°	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
wt%															
SiO2	45.62	45.68	45.91	45.72	45.76	45.79	45.79	45.59	45.32	45.19	45.08	45.95	45.88	45.16	45.88
TiO2	2.40	2.42	2.45	2.43	2.40	2.39	2.39	2.40	2.40	2.42	2.40	2.41	2.42	2.37	2.42
Al2O3	14.05	14.20	14.23	14.26	14.03	14.07	14.02	14.02	13.86	14.05	14.14	14.06	14.15	13.80	14.15
Fe2O3	12.07	12.05	12.12	11.96	12.04	12.00	12.02	11.95	12.01	12.01	11.99	12.01	11.98	11.87	11.95
MnO	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
MgO	8.83	8.67	8.79	8.49	8.87	8.80	8.98	8.59	8.99	8.29	8.45	9.12	8.79	8.70	8.53
CaO	9.25	9.24	9.32	9.28	9.17	9.29	9.24	9.29	9.19	9.39	9.23	9.25	9.33	9.20	9.36
K2O	2.03	2.06	2.08	2.14	2.12	2.06	2.02	1.94	1.97	2.10	2.09	1.95	1.91	2.00	1.93
Na2O	4.71	4.79	4.85	4.75	4.77	4.64	4.59	4.70	4.69	4.90	4.72	4.66	4.30	4.69	4.88
P2O5	0.88	0.89	0.91	0.90	0.88	0.88	0.87	0.86	0.87	0.91	0.90	0.86	0.87	0.87	0.88
PF	0.23	-0.15	-0.15	-0.06	0.32	-0.02	-0.30	-0.12	-0.14	0.01	-0.03	0.50	-0.27	-0.36	-0.18
total	100.04	100.20	100.85	100.13	100.25	100.11	100.12	99.54	99.47	99.44	99.18	100.46	99.81	98.84	100.17
ppm															
V	200.2	199.3	197.3	202.9	195.8	203.3	197.9	194.1	194.8	203.6	192.4	194.5	196.9	202.5	200.1
Cr	405.4	239.3	256.8	244.9	271.3	260.9	304.9	261.2	262.4	255.2	238.4	273	286.9	351.3	255.2
Co	47.2	47	57.8	90.2	78.6	45.7	106.3	45.9	45.6	46.3	44.8	86.7	50.9	42.7	74.1
Ni	274	159.3	163.6	157.6	183.5	165.9	224.4	153.6	172.5	147.5	167.7	213.7	198.6	482.6	156.1
Cu	43.7	41.4	39.5	42.8	45.3	43.6	40.8	31.5	35.4	36.7	39.4	43.6	39.7	36	39.9
Zn	98.1	101.5	103.8	101.5	114.5	105.7	107.5	105.7	106.7	105	103.4	98.1	100.2	101.1	101.5
Ga	46.2	45.6	44.1	46.6	45.5	43.5	43.2	40	40	44.2	39.7	44.6	41.8	38.5	44.8
Rb	59.8	64.1	67.5	67.4	63.6	62.3	61.1	62.4	62.2	61.3	63.4	62.9	58.6	60.8	62.8
Sr	949.5	981.2	988.9	988.4	973.6	943.7	938.8	940.4	934.4	972.3	965.7	959.2	958.7	920.8	956.1
Zr	277.3	286.8	286.1	289.6	285.5	275.9	273	265.4	262.8	280.5	277.2	275.5	274.1	268.8	278.6
Nb	101.6	105.8	105	106.6	105.4	102.8	101	97.9	98.9	103.1	101.6	101.2	100.2	95.8	103.3
Ba	798.8	813.5	798.2	797.7	789.5	784.2	778.1	769.1	780.3	790.4	802.9	781.6	788.3	758.8	776.6
Pb	3.1	0	6.2	9.3	8.4	6.8	4.4	10.9	8.8	8.4	5.6	3.4	8.1	9.9	6.4
Y*	24.819	25.677	25.904	25.33	25.26	25.838	24.45	28.6	28.6	29.2	29.1	23.923	23.942	25.794	
La*	60.845	62.648	62.788	62.518	60.635	62.488	59.716	62.4	62.4	65	65.4	57.416	57.81	62.622	
Ce*	114.05	116.47	118.54	114.18	114.37	115.67	109.86	119.3	117.8	123.2	123.3	106.95	109.42	116.42	
Nd*	49.808	49.412	50.399	49.603	49.428	49.99	47.886	48.4	48.8	49.7	49.8	46.721	46.812	49.932	
Sm*	9.622	9.7648	9.6857	9.5391	9.4832	9.7364	9.2954	10.3	10.3	10.6	10.5	9.119	9.3342	9.8761	
Eu*	2.9149	2.9324	2.9845	2.8764	2.9024	2.9645	2.7971	3	3	3.1	3.1	2.7216	2.7805	2.9518	
Gd*	8.1221	7.8824	8.2779	7.9541	7.8739	8.2251	7.6054	9.1	9.1	9.4	9.2	7.571	7.755	8.083	
Dy*	5.8298	5.7942	5.9409	5.6941	5.7187	5.9	5.6899	6.1	6.2	6.2	6.2	5.6009	5.7528	5.9864	
Er*	1.4886	2.603	2.5228	2.5036	2.6093	2.6419	2.3126	2.8	2.9	3	2.9	2.0377	0.05358	0.0091865	
Tb*	1.6697	1.1941	1.2163	1.1388	1.1782	1.2468	1.2366	1.3	1.4	1.3	1.3	1.0554	1.1703	1.1918	
Tm*	0.3962	0.38236	0.37729	0.3933	0.3822	0.39527	0.38027	0.4	0.4	0.4	0.4	0.37433	0.37224	0.39449	
Yb*	2.0517	2.05	2.0976	2.0692	2.0691	2.0955	1.9408	2.6	2.6	2.6	2.7	1.9617	1.9881	2.0856	
[Mg]	0.61	0.61	0.61	0.60	0.61	0.61	0.62	0.61	0.62	0.60	0.60	0.62	0.61	0.61	0.60
La/Yb	29.66	30.56	29.93	30.21	29.31	29.82	30.77	24.00	24.00	25.00	24.22	29.27	29.08	30.03	
Analyses par florescence X sur perles lourdes															
La Palisse, zone à débit planaire															
La Palisse, zone à débit planaire															
La Palisse, zone à débit planaire															
La Palisse, zone à débit planaire															
La Palisse, pseudo-colonnade															
* Analyses par ICP-AES															
31															
32															
33															
34															
35															
36															
37															
38															
39															
08 TB 104A															
08 TB 105 Bot															
08 TB 105A															
08 TB 107A															
08 TB 109A															
08 Tb 60 Bot															
08 Tb 93 Bot															
08TB60B															
08TB93B															
08 TB 50 Bot															
08 Tb 50B															
08 TB 54 Bot															
08 Tb 58 Bot															



La Palisse										Saint-Arcons-d'Allier									
N°	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60				
wt %																			
SiO2	46.16	45.78	45.46	45.32	45.92	45.38	45.04	45.33	45.55	45.26	44.79	45.33	44.44	45.19	45.25				
TiO2	2.41	2.40	2.38	2.37	2.38	2.39	2.39	2.42	2.38	2.65	2.61	2.65	2.60	2.66	2.68				
Al2O3	14.12	14.07	13.86	13.80	13.84	13.87	13.83	13.93	13.95	14.03	13.86	13.96	13.75	14.00	14.03				
Fe2O3	12.03	12.01	11.85	12.02	12.09	11.91	11.86	11.76	12.12	12.02	11.92	12.00	11.97	12.08	12.01				
MnO	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19				
MgO	8.82	8.91	8.81	8.89	9.38	8.74	8.76	8.65	8.86	9.73	9.54	9.43	9.69	9.60	9.50				
CaO	9.32	9.19	9.23	9.14	9.29	9.20	9.19	9.31	9.25	10.12	10.05	10.13	10.03	10.22	10.28				
K2O	1.98	2.02	1.93	1.88	1.93	2.00	1.53	1.80	1.92	1.71	1.69	1.72	1.68	1.69	1.70				
Na2O	4.76	4.79	4.61	4.59	4.68	4.67	4.42	4.63	4.69	4.05	4.12	4.09	3.96	4.06	4.08				
P2O5	0.88	0.87	0.88	0.86	0.86	0.87	0.86	0.87	0.85	0.68	0.70	0.67	0.68	0.67	0.68				
PF	0.30	0.01	-0.28	0.29	0.27	0.02	-0.28	0.01	-0.01	-0.17	-0.02	-0.23	-0.19	-0.28	-0.26				
total	100.67	100.23	99.19	99.07	100.56	99.21	98.07	98.90	99.77	100.43	99.48	100.16	98.98	100.36	100.40				
ppm																			
V	198.2	195	197.6	200	202.4	192.2	196.7	193.5	197.9	230.4	232.7	231.5	233.5	234.1	236.9				
Cr	269.4	256.4	283.5	324.3	285.2	257.7	263.5	272.1	263.1	296.8	291.4	279.5	286.3	309.5	296.5				
Co	43.9	49.2	43.2	78.7	46.7	46.4	44.7	41.8	44.4	48.4	47.6	48	45.3	48.5	96.7				
Ni	171.5	185.9	243.1	230.3	199.4	164.9	142.6	159	166.1	184	209.4	163.8	184.1	185.4	191.4				
Cu	48.1	45.3	64	47.1	44.6	35.2	21.1	30.4	40.6	41.4	48.2	38.8	36.4	42.8	38.2				
Zn	108.1	93.9	90.2	100.3	97.6	99.9	113.2	100.6	113.2	95.4	90.8	93.4	99.5	96.3	109.2				
Ga	45.6	44.7	41.1	41.9	43.8	40.9	39.1	39.2	40.9	44.1	43.2	46	43.7	44	42.4				
Rb	63.4	61.8	59.6	63.1	57.7	61.3	70	53.3	62.1	46.7	41.1	53.6	45.2	42.5	45				
Sr	953.5	947.1	927.5	923.2	935.3	947.9	918.5	941.2	936.4	826.9	809	821.6	803.7	827.3	839.6				
Zr	279.3	276.3	269.9	266.3	271.5	261.6	261.4	260.5	266.5	244.3	242.8	245	244.7	259.1	243				
Nb	102.2	101.3	100.5	96	97.5	97.2	97	98.8	98.9	83.5	80.4	84.6	82.4	85.2	83.5				
Ba	777.5	779.2	761	759.5	746.6	758.4	779.6	766.7	756	609.9	607.1	632.2	615.3	622.5	613				
Pb	8.7	5.6	3.1	9.1	10.7	11	5.2	5.4	5.3	0	2.6	3.3	4.5	7.7	2.7				
Y*	25.623	24.753	25.103	19.079	24.383	28.3	28.402	28.198	25.545	21.472	23.349	23.058	22.871	23.172					
La*	60.994	62.689	63.328	37.487	59.659	62.7	62.82	61.4	49.18	45.159	48.574	48.275	47.338	38.095					
Ce*	113.15	116	112.39	81.687	110.38	117.6	118.9	118.2	95.8	88.279	92.733	93.71	93.821	93.376					
Nd*	49.878	50.093	50.206	35.808	48.131	48.2	49.1	47.7	40.8	39.624	42.778	42.596	42.205	42.392					
Sm*	9.7477	9.5498	9.4992	7.4414	9.4245	10.2	10.2	10.1	8.9	8.0121	8.7213	8.6327	8.5836	8.7361					
Eu*	2.8787	2.9294	2.8497	2.059	2.8043	3	3	3	2.7	2.4706	2.5722	2.6097	2.6093	2.5836					
Gd*	7.724	8.1144	7.7876	6.1265	7.8681	8.9	9.2	9	8	7.3712	7.0929	7.2696	7.1007	7.1608					
Dy*	5.8429	5.683	5.8193	4.3082	5.6489	6	6.1	6.1	5.6	5.0695	5.5198	5.2534	5.4182	5.3849					
Er*	0.85791	2.5222	1.5803	0.22548	2.0463	2.7	2.8	2.6	2.4	4.7781	2.1582	2.2632	0.90684	1.3691					
Tb*	1.2427	1.1776	1.1867	1.1917	1.1269	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2586	1.1288	0.96266	0.97813	1.1715					
Tm*	0.41328	0.37789	0.39081	0.29933	0.37179	0.4	0.4061	0.407	0.37	0.36419	0.36431	0.34928	0.35361	0.36949					
Yb*	2.0778	2.0506	2.0339	1.5218	1.9858	2.599	2.615	2.601	2.346	1.7714	1.8629	1.843	1.865	1.8962					
[Mg]	0.61	0.61	0.61	0.61	0.62	0.61	0.61	0.61	0.61	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63				
La/Yb	29.36	30.57	31.14	24.63	30.04	24.12	24.02	23.61	20.96	25.49	26.07	26.19	25.38	20.09					

St Arcons, prisme STA-F

La Palisse, pseudo-colonnade

\* Analyses par ICP-AES

Analyses par florescence X sur perles lourdes

La Palisse, pseudo-colonnade

St Arcons, prisme STA-F

La Palisse, pseudo-colonnade

\* Analyses par ICP-AES

Analyses par florescence X sur perles lourdes

La Palisse, pseudo-colonnade

St Arcons, prisme STA-F

La Palisse, pseudo-colonnade

\* Analyses par ICP-AES

Analyses par florescence X sur perles lourdes

La Palisse, pseudo-colonnade

St Arcons, prisme STA-F

La Palisse, pseudo-colonnade

\* Analyses par ICP-AES

Analyses par florescence X sur perles lourdes

La Palisse, pseudo-colonnade

St Arcons, prisme STA-F

La Palisse, pseudo-colonnade

\* Analyses par ICP-AES

Analyses par florescence X sur perles lourdes

La Palisse, pseudo-colonnade

St Arcons, prisme STA-F

La Palisse, pseudo-colonnade

\* Analyses par ICP-AES

Analyses par florescence X sur perles lourdes

La Palisse, pseudo-colonnade

St Arcons, prisme STA-F

La Palisse, pseudo-colonnade

\* Analyses par ICP-AES

Analyses par florescence X sur perles lourdes

La Palisse, pseudo-colonnade

St Arcons, prisme STA-F

La Palisse, pseudo-colonnade

\* Analyses par ICP-AES

Analyses par florescence X sur perles lourdes

La Palisse, pseudo-colonnade

St Arcons, prisme STA-F

La Palisse, pseudo-colonnade

\* Analyses par ICP-AES

Analyses par florescence X sur perles lourdes

La Palisse, pseudo-colonnade

St Arcons, prisme STA-F

La Palisse, pseudo-colonnade

\* Analyses par ICP-AES

Analyses par florescence X sur perles lourdes

La Palisse, pseudo-colonnade

St Arcons, prisme STA-F

La Palisse, pseudo-colonnade

\* Analyses par ICP-AES

Analyses par florescence X sur perles lourdes

La Palisse, pseudo-colonnade

St Arcons, prisme STA-F

La Palisse, pseudo-colonnade

\* Analyses par ICP-AES

Analyses par florescence X sur perles lourdes

La Palisse, pseudo-colonnade

St Arcons, prisme STA-F

La Palisse, pseudo-colonnade

\* Analyses par ICP-AES

Analyses par florescence X sur perles lourdes

La Palisse, pseudo-colonnade

St Arcons, prisme STA-F

La Palisse, pseudo-colonnade

\* Analyses par ICP-AES

Analyses par florescence X sur perles lourdes

La Palisse, pseudo-colonnade

St Arcons, prisme STA-F

La Palisse, pseudo-colonnade

\* Analyses par ICP-AES

Analyses par florescence X sur perles lourdes

La Palisse, pseudo-colonnade

St Arcons, prisme STA-F

La Palisse, pseudo-colonnade

\* Analyses par ICP-AES

Analyses par florescence X sur perles lourdes

La Palisse, pseudo-colonnade

St Arcons, prisme STA-F

La Palisse, pseudo-colonnade

\* Analyses par ICP-AES

Analyses par florescence X sur perles lourdes

La Palisse, pseudo-colonnade

St Arcons, prisme STA-F

La Palisse, pseudo-colonnade

\* Analyses par ICP-AES

Analyses par florescence X sur perles lourdes

La Palisse, pseudo-colonnade

St Arcons, prisme STA-F

La Palisse

N°	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73
wt %													
SiO2	44.94	45.54	44.86	44.66	45.37	45.21	45.11	45.23	44.58	44.84	44.68	45.15	44.03
TiO2	2.63	2.66	2.65	2.63	2.64	2.65	2.58	2.58	2.57	2.55	2.58	2.57	2.54
Al2O3	13.84	14.05	13.85	13.65	14.04	13.95	13.78	13.95	13.60	13.70	13.72	13.82	13.44
Fe2O3	11.96	12.07	11.87	12.02	12.11	12.20	12.00	12.01	12.19	11.90	11.95	12.00	11.82
MnO	0.19	0.19	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
MgO	9.41	9.56	9.06	9.53	9.76	9.48	9.92	10.02	9.84	9.74	9.66	9.86	9.53
CaO	10.11	10.16	10.07	10.10	10.17	10.26	10.14	10.09	10.02	10.00	10.13	10.07	9.94
K2O	1.58	1.61	1.59	1.68	1.74	1.75	1.75	1.75	1.71	1.75	1.73	1.74	1.72
Na2O	3.94	4.17	3.86	3.91	4.10	3.99	3.94	3.99	4.06	4.06	4.12	4.08	4.12
P2O5	0.66	0.68	0.69	0.66	0.66	0.68	0.65	0.65	0.64	0.64	0.66	0.64	0.63
PF	0.29	-0.27	0.89	0.27	-0.18	0.35	-0.30	0.23	0.11	-0.18	-0.29	-0.19	0.19
total	99.26	100.69	98.66	99.01	100.76	100.33	100.05	100.45	99.39	99.37	99.41	100.13	97.94
ppm													
V	230.2	239.8	230.3	239.7	234.9	232.8	233.3	233.5	231.1	236	236.4	234.1	225
Cr	285.2	278.1	277.7	285.6	309.6	283.5	317	430	307.8	359.2	310.1	307.3	291.2
Co	48.4	45.6	43.8	47.9	52	52.5	124.2	47.7	49.4	92.3	51.4	92.5	48
Ni	171	167.8	158.7	177.2	192.3	176.7	193.1	340.5	206.8	335.8	183.1	217.8	178.1
Cu	43.7	47.2	32.8	37.6	41.2	36.6	40.7	46.6	40.8	40.1	40.4	41.9	33.5
Zn	95.8	115.8	90.1	91.7	101.1	97.6	95	97	100	99.2	100.2	92.7	95.8
Ga	43.1	44.9	39.1	43.3	44.4	45	44.4	42.6	40	42.9	39.6	45	41.2
Rb	43.8	40.2	57.1	40.2	44.8	51.2	42.7	40.2	43.9	46.6	37.9	44.9	49.2
Sr	825.9	838.5	827.1	812	825.1	828.1	787.1	783.5	775.7	778.4	782	782.2	770.5
Zr	245.6	248.6	235.9	238.1	246.9	269.6	237.5	239.2	227.6	237.4	236	241.1	228.4
Nb	83.3	86.5	81.6	81.6	82.4	84.6	80.6	82	79.4	80.4	81	81.2	77.9
Ba	616.2	610	633.8	615	616.9	620.8	581.5	575.3	568.2	589.8	608.8	577.4	583.4
Pb	6.3	9	10.1	2.6	5.8	9.8	2	8.9	5.2	3.1	66.9	3.5	4
Y*	22.248	22.735	25.518	22.502	23.056	26.35	22.311	22.049	28.7	22.548	25.49	21.658	24.83
La*	47.385	48.294	49.5	48.155	47.742	49.56	47.265	48.32	62.74	46.23	48.52	45.719	48.4
Ce*	92.169	94.611	97.03	93.684	92.573	97.4	91.594	91.086	118.7	89.908	94.82	89.386	95.42
Nd*	42.473	42.363	41.3	42.318	42.793	41.25	41.393	41.655	48.96	41.409	41.27	39.564	40.1
Sm*	8.4945	8.6421	9.024	8.2594	8.7042	9.024	8.4548	8.1921	10.32	8.3952	8.952	7.9715	8.772
Eu*	2.5744	2.6096	2.684	2.6237	2.5763	2.684	2.5658	2.5215	2.99	2.5072	2.638	2.4882	2.648
Gd*	7.9167	6.7781	8.09	8.4345	7.2195	8.193	7.075	6.8037	9.118	7.3458	8.11	7.0044	7.86
Dy*	5.2874	5.3942	5.573	5.1657	5.2982	5.701	5.2255	5.193	6.215	5.2753	5.522	5.0701	5.472
Er*	2.6639	0.67781	2.49	1.9642	1.6331	2.601	1.4679	0.31936	2.791	1.0267	2.457	2.1687	2.43
Tb*	0.95058	1.0845	1.261	0.94851	1.1004	1.249	1.0187	1.033	1.269	1.506	1.154	1.0902	1.127
Tm*	0.34672	0.3502	0.37	0.34146	0.35224	0.381	0.34054	0.34157	0.4104	0.37721	0.3653	0.33117	0.3602
Yb*	1.8	1.8593	2.38	1.8066	1.8573	2.386	1.8025	1.7939	2.571	1.8237	2.303	1.7291	2.296
[Mg]	0.63	0.63	0.62	0.63	0.63	0.63	0.64	0.64	0.63	0.64	0.63	0.64	0.63
La/Yb	26.33	25.99	20.80	26.66	25.71	20.77	26.22	26.94	24.40	25.35	21.07	26.44	21.08

Analyses par fluorescence X sur perles lourdes

St Arcons, prisme longueur

St Arcons, prisme longueur

\* Analyses par ICP-AES

70

Sta 4-4A

71

Sta 4-5

72

Sta 4-6A

73

STA-4-6D

61

Sta 6-1A

62

Sta 6-2

63

STA-6-2A

64

Sta 1-2A

65

Sta 2-2A

66

STA-1-2D

67

Sta 3-3A

68

Sta 4-1

69

STA-4-1A

Elements	Incertitudes (déviation standard par rapport a la courbe d'étalonnage)
Na2O	0,05983 %
MgO	0,1037 %
Al2O3	0,1891 %
SiO2	0,4205 %
P2O5	67,10 ppm
K2O	393,5 ppm
CaO	0,03374 %
Sc	1,267 ppm
TiO2	0,02015 %
V	3,198 ppm
Cr	19,4 ppm
MnO	24,99 ppm
Fe2O3	0,1287 %
Co	1,606 ppm
Ni	4,903 ppm
Cu	10,07 ppm
Zn	7,883 ppm
Ga	1,8 ppm
Rb	8,647 ppm
Sr	5,647 ppm
Y	1,527 ppm
Zr	7,651 ppm
Nb	2,197 ppm
Cs	10,38 ppm
Ba	10,43 ppm
La	2,781 ppm
Ce	6,247 ppm
Ta	5,523 ppm
W	7,562 ppm
Pb	4,077 ppm
Th	2,109 ppm
U	1,084 ppm



## Annexe III : Compositions en éléments majeurs des minéraux par microsonde électronique

**Clinopyroxènes Ca(Mg,Fe)Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>**

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<i>% poids d'oxydes</i>																
SiO <sub>2</sub>	50.73	50.28	49.59	49.35	49.19	49.09	48.35	47.85	47.83	47.51	47.30	46.68	46.64	46.42	46.18	45.91
MgO	14.86	14.55	14.16	14.40	13.96	13.83	13.45	12.55	13.08	12.03	13.33	12.28	12.31	11.99	11.93	11.90
FeO	6.05	6.22	6.93	7.02	7.31	6.02	6.30	8.56	8.34	7.65	6.27	8.01	8.05	7.85	7.46	7.95
Na <sub>2</sub> O	0.43	0.38	0.40	0.39	0.46	0.56	0.55	0.59	0.41	0.80	0.57	0.70	0.57	0.68	0.54	0.67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.48	3.60	4.06	4.06	4.31	5.32	6.17	4.97	4.90	6.05	6.31	6.32	5.80	6.60	7.21	6.22
K <sub>2</sub> O	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.00	0.03	0.05	0.03	0.04
CaO	22.33	22.47	21.96	22.58	21.73	22.75	22.34	21.98	21.81	22.58	22.47	22.34	22.06	22.42	22.76	23.10
MnO	0.15	0.07	0.18	0.13	0.13	0.13	0.09	0.18	0.11	0.15	0.17	0.17	0.17	0.13	0.17	0.22
TiO <sub>2</sub>	1.48	1.63	1.69	1.82	1.97	1.65	2.05	2.48	2.45	2.90	2.31	2.79	2.73	2.96	3.43	2.79
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.33	0.41	0.20	0.11	0.22	0.84	0.81	0.07	0.03	0.03	0.66	0.03	0.00	0.02	0.11	0.00
Total	99.84	99.64	99.25	99.87	99.30	100.24	100.15	99.26	98.97	99.75	99.43	99.33	98.35	99.14	99.86	98.81

**Nombres d'ions sur la base de 6 oxygènes**

Si	1.88	1.871	1.858	1.842	1.845	1.821	1.796	1.812	1.812	1.786	1.775	1.767	1.782	1.76	1.737	1.754
Al <sub>Oc</sub>	0.032	0.029	0.038	0.02	0.035	0.054	0.066	0.034	0.031	0.055	0.054	0.049	0.043	0.055	0.057	0.034
Al <sub>Tt</sub>	0.12	0.129	0.142	0.158	0.155	0.179	0.204	0.188	0.188	0.214	0.225	0.233	0.218	0.24	0.263	0.246
Cr	0.01	0.012	0.006	0.003	0.007	0.025	0.024	0.002	0.001	0.001	0.02	0.001	0	0.001	0.003	0
Fe <sup>3+</sup>	0.037	0.037	0.038	0.065	0.044	0.074	0.064	0.057	0.048	0.055	0.084	0.077	0.062	0.069	0.053	0.103
Ti	0.041	0.046	0.048	0.051	0.055	0.046	0.057	0.071	0.07	0.082	0.065	0.079	0.078	0.084	0.097	0.08
Mg	0.821	0.807	0.791	0.801	0.78	0.765	0.745	0.708	0.739	0.674	0.745	0.693	0.701	0.678	0.669	0.678
Fe <sup>2+</sup>	0.15	0.157	0.179	0.154	0.185	0.113	0.132	0.214	0.216	0.186	0.113	0.177	0.195	0.18	0.182	0.151
Mn	0.005	0.002	0.006	0.004	0.004	0.004	0.003	0.006	0.003	0.005	0.006	0.006	0.005	0.004	0.005	0.007
Ca	0.887	0.896	0.882	0.903	0.873	0.904	0.889	0.892	0.885	0.91	0.904	0.906	0.903	0.911	0.917	0.946
Na	0.031	0.028	0.029	0.029	0.033	0.04	0.04	0.044	0.03	0.058	0.041	0.051	0.042	0.05	0.039	0.05
K	0	0	0	0	0.001	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0	0.001	0.003	0.001	0.002
Octa	2	2	2.01	2.03	2.01	2	2	2.03	2.02	2.03	2.01	2.04	2.03	2.03	2.02	2.05

**Pourcentages moléculaires**

Wo	46.66	47.18	46.52	46.86	46.29	48.60	48.50	47.52	46.80	49.73	48.81	48.76	48.39	49.46	50.22	50.19
En	43.19	42.50	41.72	41.57	41.36	41.13	40.64	37.72	39.08	36.83	40.23	37.30	37.57	36.81	36.64	35.97
Fe	10.15	10.32	11.76	11.57	12.35	10.27	10.86	14.76	14.12	13.44	10.96	13.94	14.04	13.74	13.14	13.85
mg*	84.12	83.54	81.05	83.52	80.50	86.73	84.66	76.29	77.14	77.92	86.23	79.11	77.80	78.65	78.15	81.10

La Palisse, colonnade

1	08TB14B zone 1-cpx5-coeur	10	08TB14B zone 1-cpx7-bord
2	08TB14B zone 1-cpx2-coeur	11	08TB14B zone 1-cpx3-coeur
3	08TB14B zone 1-cpx4-coeur	12	08TB14B zone 1-cpx8-bord
4	08TB14B zone 1-cpx8-coeur	13	08TB14B zone 1-cpx18-micro
5	08TB14B cpx1 coeur	14	08TB14B zone 1-cpx13-micro
6	08TB14B zone 1-cpx6-coeur	15	08TB14B zone 1-cpx5-bord
7	08TB14B zone 1-cpx9-coeur	16	08TB14B zone 1-cpx20-micro
8	08TB14B zone 1-cpx17-micro		
9	08TB14B zone 1-cpx19-micro		

mg\* = (100\*Mg / (Mg + Fe<sup>2+</sup> + Mn))

Octa = somme des cations du site octaédrique

Clinopyroxènes Ca(Mg,Fe)Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>

°	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	33	34
% poids d'oxydes																
SiO <sub>2</sub>	45.69	45.67	45.56	45.20	45.14	45.10	44.72	44.66	44.45	44.32	44.32	43.79	43.54	42.97	49.09	48.77
MgO	11.76	11.96	12.54	12.18	11.43	11.86	11.49	11.73	11.77	11.74	11.64	11.41	11.00	11.12	14.20	13.48
FeO	8.00	8.07	7.04	7.06	8.51	7.71	8.11	7.48	7.75	7.41	7.98	8.03	8.34	8.11	6.98	7.78
Na <sub>2</sub> O	0.54	0.67	0.54	0.48	0.74	0.56	0.58	0.56	0.51	0.59	0.58	0.58	0.65	0.54	0.42	0.46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.75	6.60	7.50	8.14	7.55	7.82	7.81	7.97	7.95	8.30	8.36	8.57	8.89	9.45	3.96	4.40
K <sub>2</sub> O	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.07	0.01	0.03	0.01	0.01	0.03	0.06	0.00	0.03	0.00
CaO	22.52	23.15	22.64	22.43	22.54	22.81	22.29	21.97	22.41	22.64	22.34	22.59	21.97	22.22	22.59	22.65
MnO	0.12	0.13	0.11	0.09	0.12	0.14	0.17	0.13	0.12	0.12	0.15	0.11	0.13	0.12	0.14	0.16
TiO <sub>2</sub>	3.07	2.98	3.04	3.35	3.54	3.64	3.87	3.70	3.65	3.56	3.80	4.41	4.45	4.55	1.86	2.07
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.00	0.56	0.66	0.01	0.18	0.12	0.44	0.35	0.46	0.25	0.19	0.01	0.16	0.20	0.00
Total	99.52	99.26	99.54	99.60	99.59	99.86	99.24	98.64	99.00	99.15	99.43	99.72	99.04	99.26	99.46	99.76
Nombres d'ions sur la base de 6 oxygènes																
Si	1.727	1.738	1.719	1.703	1.713	1.702	1.701	1.702	1.693	1.685	1.682	1.661	1.662	1.637	1.841	1.83
Al_Oc	0.072	0.034	0.052	0.064	0.051	0.05	0.051	0.06	0.05	0.057	0.056	0.044	0.062	0.061	0.016	0.025
Al_Tt	0.273	0.262	0.281	0.297	0.287	0.298	0.299	0.298	0.307	0.315	0.318	0.339	0.338	0.363	0.159	0.17
Cr	0.001	0	0.017	0.02	0	0.005	0.004	0.013	0.011	0.014	0.007	0.006	0	0.005	0.006	0
Fe <sup>3+</sup>	0.066	0.108	0.096	0.078	0.089	0.082	0.073	0.068	0.086	0.099	0.088	0.087	0.072	0.081	0.069	0.061
Ti	0.087	0.085	0.086	0.095	0.101	0.103	0.111	0.106	0.105	0.102	0.109	0.126	0.128	0.13	0.052	0.058
Mg	0.663	0.678	0.705	0.684	0.647	0.667	0.651	0.667	0.668	0.665	0.659	0.645	0.626	0.632	0.794	0.754
Fe <sup>2+</sup>	0.186	0.149	0.126	0.144	0.181	0.162	0.185	0.171	0.16	0.136	0.165	0.167	0.195	0.178	0.15	0.183
Mn	0.004	0.004	0.003	0.003	0.004	0.004	0.006	0.004	0.004	0.004	0.005	0.003	0.004	0.004	0.004	0.005
Ca	0.912	0.944	0.915	0.905	0.916	0.923	0.908	0.897	0.915	0.922	0.908	0.918	0.899	0.907	0.908	0.911
Na	0.04	0.049	0.039	0.035	0.055	0.041	0.043	0.041	0.038	0.044	0.043	0.043	0.048	0.04	0.031	0.033
K	0.001	0.001	0	0	0	0	0.004	0.001	0.001	0	0.001	0.001	0.003	0	0.001	0
Octa	2.03	2.05	2.02	2.01	2.04	2.03	2.03	2.01	2.03	2.03	2.03	2.04	2.04	2.03	2.03	2.03
Pourcentages moléculaires																
Wo	49.78	50.13	49.59	49.89	49.86	50.24	49.81	49.67	49.89	50.47	49.75	50.41	50.08	50.33	47.17	47.60
En	36.19	36.01	38.21	37.71	35.22	36.31	35.71	36.93	36.42	36.40	36.11	35.42	34.87	35.07	41.25	39.39
Fe	14.03	13.86	12.20	12.40	14.92	13.45	14.48	13.40	13.69	13.14	14.14	14.17	15.04	14.59	11.58	13.01
mg*	77.73	81.59	84.53	82.31	77.76	80.07	77.32	79.22	80.29	82.61	79.49	79.14	75.88	77.64	83.76	80.04

## La Palisse, colonnade

## La Palisse, colonnade, bord prisme

17	08TB14B cpx1 bord	26	08TB14B zone1-cpx2-bord	33	07TB02-zone1-cpx7-bord
18	08TB14B zone1-cpx20-micro bis	27	08TB14B zone1-cpx14-micro	34	07TB02-zone1-cpx7-coeur
19	08TB14B zone1-cpx3-bord	28	08TB14B zone1-cpx10-micro		
20	08TB14B zone1-cpx4-bord	29	08TB14B zone1-cpx15-micro		
21	08TB14B zone1-cpx7-coeur	30	08TB14B zone1-cpx6-bord		
22	08TB14B zone1-cpx9-bord				
23	08TB14B zone1-cpx12-micro				
24	08TB14B zone1-cpx11-micro				
25	08TB14B zone1-cpx16-micro				



Clinopyroxènes Ca(Mg,Fe)Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>																
N°	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
% poids d'oxydes																
SiO2	48.74	45.02	44.83	44.22	44.16	43.73	42.84	50.01	46.82	45.82	44.89	50.35	48.11	48.07	47.91	47.46
MgO	13.42	11.34	11.23	11.69	11.37	10.92	10.87	14.34	12.88	12.71	12.03	14.68	13.29	13.39	12.53	12.38
FeO	8.21	8.54	8.57	7.81	8.60	8.94	8.57	6.54	7.12	6.86	7.89	6.48	6.85	8.20	8.32	7.58
Na2O	0.55	0.65	0.77	0.60	0.65	0.72	0.64	0.39	0.61	0.55	0.56	0.43	0.60	0.45	0.58	0.61
Al2O3	4.26	7.58	7.62	7.90	7.51	8.64	9.42	3.98	6.22	6.65	7.50	3.71	6.12	5.00	5.03	6.26
K2O	0.04	0.09	0.09	0.00	0.08	0.03	0.05	0.01	0.02	0.03	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
CaO	22.06	22.11	22.17	22.28	22.32	21.96	22.26	22.54	22.40	23.11	22.32	22.32	22.41	22.46	22.40	22.34
MnO	0.18	0.12	0.17	0.13	0.15	0.09	0.16	0.13	0.11	0.06	0.11	0.17	0.11	0.17	0.25	0.14
TiO2	1.98	3.49	3.60	4.15	3.62	4.01	4.72	1.61	2.41	2.73	3.70	1.64	2.14	2.22	2.53	2.83
Cr2O3	0.00	0.03	0.04	0.28	0.02	0.07	0.10	0.12	0.49	0.28	0.29	0.10	0.40	0.02	0.03	0.01
Total	99.43	98.97	99.11	99.05	98.48	99.12	99.65	99.68	99.08	98.82	99.35	99.89	100.04	99.98	99.60	99.60
Nombres d'ions sur la base de 6 oxygènes																
Si	1.837	1.718	1.711	1.685	1.699	1.672	1.631	1.862	1.77	1.741	1.704	1.869	1.793	1.805	1.808	1.783
Al_Oc	0.026	0.059	0.054	0.039	0.04	0.061	0.054	0.037	0.047	0.039	0.04	0.031	0.062	0.026	0.032	0.061
Al_Tt	0.163	0.282	0.289	0.315	0.301	0.328	0.369	0.138	0.23	0.259	0.296	0.131	0.207	0.195	0.192	0.217
Cr	0	0.001	0.001	0.008	0.001	0.002	0.003	0.003	0.015	0.008	0.009	0.003	0.012	0.001	0.001	0
Fe <sup>3+</sup>	0.066	0.075	0.089	0.082	0.104	0.091	0.094	0.039	0.091	0.106	0.088	0.039	0.068	0.077	0.059	0.041
Ti	0.056	0.1	0.103	0.119	0.105	0.115	0.135	0.045	0.069	0.078	0.106	0.046	0.06	0.063	0.072	0.08
Mg	0.754	0.645	0.639	0.664	0.652	0.622	0.617	0.796	0.726	0.72	0.681	0.812	0.738	0.749	0.705	0.693
Fe <sup>2+</sup>	0.192	0.197	0.184	0.167	0.172	0.195	0.179	0.165	0.135	0.113	0.163	0.162	0.146	0.181	0.204	0.197
Mn	0.006	0.004	0.005	0.004	0.005	0.003	0.005	0.004	0.004	0.002	0.004	0.005	0.003	0.005	0.008	0.004
Ca	0.891	0.904	0.907	0.909	0.92	0.899	0.908	0.899	0.907	0.941	0.908	0.888	0.895	0.904	0.906	0.9
Na	0.04	0.048	0.057	0.044	0.049	0.053	0.047	0.028	0.044	0.04	0.041	0.031	0.043	0.033	0.043	0.044
K.	0.002	0.004	0.004	0	0.004	0.001	0.003	0	0.001	0.001	0.001	0	0	0	0	0
Octa	2.03	2.04	2.04	2.03	2.05	2.04	2.04	2.01	2.02	2.04	2.03	2.01	2.02	2.04	2.03	2.02
Pourcentages moléculaires																
Wo	46.65	49.51	49.70	49.78	49.62	49.67	50.36	47.24	48.71	50.03	49.24	46.59	48.38	47.18	48.14	49.05
En	39.48	35.32	35.01	36.36	35.17	34.36	34.22	41.83	38.99	38.28	36.93	42.60	39.89	39.09	37.46	37.77
Fe	13.87	15.17	15.29	13.86	15.21	15.97	15.42	10.93	12.30	11.70	13.83	10.81	11.73	13.73	14.40	13.19
mg*	79.20	76.24	77.17	79.52	78.65	75.85	77.03	82.49	83.93	86.23	80.31	82.94	83.20	80.11	76.88	77.52

Clinopyroxènes Ca(Mg,Fe)Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>

N°	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
% poids d'oxydes																
SiO <sub>2</sub>	47.74	48.16	46.58	45.53	47.51	46.96	47.41	46.26	47.08	46.29	47.17	46.86	49.49	45.94	45.87	47.81
MgO	13.28	13.33	12.40	11.50	12.67	11.96	13.09	12.22	12.91	12.75	12.82	12.99	14.02	12.20	11.17	13.14
FeO	7.91	8.14	7.94	8.70	7.59	8.20	6.56	7.32	6.78	7.20	7.32	6.87	7.16	8.40	8.31	6.60
Na <sub>2</sub> O	0.43	0.48	0.56	0.66	0.62	0.63	0.63	0.51	0.53	0.51	0.64	0.53	0.38	0.58	0.71	0.58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.10	5.24	6.65	7.30	5.63	6.21	6.11	7.10	6.38	6.74	6.24	6.48	4.14	6.69	7.53	5.94
K <sub>2</sub> O	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.07	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.04	0.00	0.04	0.05	0.01
CaO	21.77	21.67	22.19	22.04	22.95	22.13	22.65	22.76	22.98	22.68	22.44	23.12	22.42	22.08	22.26	22.90
MnO	0.15	0.15	0.07	0.19	0.10	0.19	0.18	0.15	0.11	0.11	0.08	0.11	0.16	0.16	0.18	0.11
TiO <sub>2</sub>	2.24	2.42	2.88	3.46	2.41	2.92	2.11	3.27	2.63	3.01	2.45	2.58	1.83	3.14	3.41	2.40
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.13	0.05	0.16	0.00	0.00	0.00	0.69	0.28	0.37	0.16	0.59	0.27	0.13	0.04	0.00	0.81
Total	98.77	99.64	99.43	99.39	99.49	99.27	99.42	99.86	99.79	99.45	99.76	99.85	99.73	99.27	99.49	100.29

Nombres d'ions sur la base de 6 oxygènes

Si	1.809	1.808	1.758	1.729	1.791	1.777	1.782	1.738	1.766	1.746	1.772	1.758	1.849	1.744	1.736	1.782
Al_Oc	0.037	0.04	0.054	0.056	0.042	0.055	0.053	0.053	0.047	0.045	0.048	0.045	0.031	0.043	0.072	0.043
Al_Tt	0.191	0.192	0.242	0.271	0.209	0.223	0.218	0.262	0.234	0.254	0.228	0.242	0.151	0.256	0.264	0.218
Cr	0.004	0.002	0.005	0	0	0	0.021	0.008	0.011	0.005	0.018	0.008	0.004	0.001	0	0.024
Fe <sup>3+</sup>	0.058	0.05	0.064	0.068	0.076	0.051	0.092	0.061	0.077	0.077	0.089	0.091	0.045	0.079	0.052	0.083
Ti	0.064	0.068	0.082	0.099	0.068	0.083	0.06	0.092	0.074	0.085	0.069	0.073	0.051	0.09	0.097	0.067
Mg	0.75	0.746	0.698	0.651	0.712	0.675	0.733	0.684	0.722	0.716	0.718	0.727	0.78	0.691	0.63	0.73
Fe <sup>2+</sup>	0.192	0.206	0.186	0.209	0.164	0.208	0.114	0.169	0.136	0.15	0.141	0.125	0.178	0.188	0.211	0.122
Mn	0.005	0.005	0.002	0.006	0.003	0.006	0.006	0.005	0.004	0.003	0.003	0.004	0.005	0.005	0.006	0.003
Ca	0.884	0.872	0.898	0.897	0.927	0.898	0.912	0.916	0.924	0.916	0.903	0.93	0.897	0.898	0.903	0.915
Na	0.032	0.035	0.041	0.048	0.046	0.046	0.046	0.037	0.039	0.037	0.047	0.038	0.028	0.043	0.052	0.042
K	0.001	0	0	0.001	0	0.004	0	0	0	0.001	0.001	0.002	0	0.002	0.003	0
Octa	2.02	2.02	2.02	2.03	2.04	2.03	2.02	2.02	2.02	2.03	2.02	2.03	2.02	2.04	2.03	2.01

Pourcentages moléculaires

Wo	46.77	46.41	48.57	49.02	49.28	48.83	49.11	49.92	49.60	49.19	48.71	49.55	47.06	48.28	50.11	49.35
En	39.68	39.70	37.75	35.57	37.85	36.70	39.47	37.28	38.75	38.45	38.73	38.73	40.92	37.15	34.96	39.37
Fe	13.54	13.89	13.68	15.41	12.87	14.46	11.42	12.81	11.65	12.35	12.57	11.72	12.01	14.57	14.93	11.27
mg*	79.20	77.95	78.78	75.17	81.00	75.93	85.93	79.72	83.76	82.39	83.29	84.93	81.00	78.17	74.38	85.38

La Palisse, zone à débit planaire

51	08tb60-zone1-px4-coeur
52	08tb60-zone1-px4-coeur-bis
53	08tb60-zone1-px5-coeur
54	08tb60-zone1-px6-micro
55	08tb60-zone1-px7-micro-bis
56	08tb60-zone1-px7-micro-ter

La Palisse, pseudo-colonnade

57	08tb50b-zone2-px1-coeur
58	08tb50b-zone2-px1-bord
59	08tb50b-zone2-px2-coeur-bis
60	08tb50b-zone2-px2-bord
61	08tb50b-zone2-px3-coeur
62	08tb50b-zone2-px3-bord
63	08tb50b-zone2-px5-micro
64	08tb50b-zone2-px6-micro
65	08tb50b-zone2-px7-micro

La Palisse, entablement

66	08tb37-zone2-px1-coeur
----	------------------------

**Clinopyroxènes Ca(Mg,Fe)Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>**

N°	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82
<i>% poids d'oxydes</i>																
SiO <sub>2</sub>	44.78	46.29	45.90	49.15	44.28	45.24	47.74	47.15	49.34	49.88	45.84	49.43	52.69	47.02	50.97	45.70
MgO	12.51	12.43	12.21	13.77	11.67	11.86	13.18	13.00	14.14	15.15	12.40	14.14	9.42	13.26	15.56	10.18
FeO	7.47	7.19	7.47	7.48	7.90	8.05	7.72	8.32	6.77	6.72	6.83	6.29	14.50	6.52	5.65	10.04
Na <sub>2</sub> O	0.55	0.56	0.48	0.38	0.62	0.58	0.40	0.48	0.40	0.42	0.63	0.52	2.29	0.58	0.43	0.97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.25	7.18	6.89	4.33	8.21	7.72	5.06	5.57	4.34	4.55	7.92	5.10	0.92	6.87	3.73	7.67
K <sub>2</sub> O	0.03	0.00	0.00	0.00	0.05	0.04	0.07	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02
CaO	22.69	22.41	22.89	21.90	22.81	22.76	22.34	22.24	22.94	21.13	21.98	22.39	19.58	22.42	22.11	22.26
MnO	0.07	0.19	0.15	0.15	0.11	0.18	0.10	0.16	0.08	0.13	0.10	0.16	0.76	0.12	0.07	0.21
TiO <sub>2</sub>	2.97	2.97	2.99	1.82	4.06	3.59	2.50	2.70	1.88	1.61	3.01	1.76	0.16	2.34	1.21	2.41
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.68	0.45	0.29	0.05	0.24	0.27	0.24	0.01	0.18	0.33	0.70	0.10	0.00	0.45	0.54	0.00
Total	99.00	99.68	99.27	99.04	99.96	100.30	99.34	99.64	100.06	99.93	99.42	99.90	100.33	99.59	100.28	99.48
<i>Nombres d'ions sur la base de 6 oxygènes</i>																
Si	1.706	1.741	1.739	1.849	1.675	1.703	1.801	1.779	1.837	1.848	1.724	1.835	2	1.762	1.875	1.745
Al <sub>Oc</sub>	0.032	0.059	0.046	0.041	0.041	0.046	0.026	0.027	0.027	0.046	0.075	0.058	0.041	0.065	0.037	0.09
Al <sub>Tt</sub>	0.294	0.259	0.261	0.151	0.325	0.297	0.199	0.221	0.163	0.152	0.276	0.165	0	0.238	0.125	0.255
Cr	0.02	0.013	0.009	0.001	0.007	0.008	0.007	0	0.005	0.01	0.021	0.003	0	0.013	0.016	0
Fe <sup>3+</sup>	0.134	0.073	0.08	0.035	0.101	0.093	0.063	0.076	0.059	0.047	0.077	0.046	0.118	0.084	0.052	0.1
Ti	0.085	0.084	0.085	0.051	0.116	0.102	0.071	0.077	0.053	0.045	0.085	0.049	0.005	0.066	0.034	0.069
Mg	0.711	0.697	0.69	0.772	0.658	0.665	0.741	0.731	0.785	0.837	0.696	0.783	0.533	0.741	0.853	0.579
Fe <sup>2+</sup>	0.105	0.153	0.156	0.2	0.149	0.161	0.181	0.186	0.151	0.161	0.138	0.149	0.342	0.12	0.122	0.221
Mn	0.002	0.006	0.005	0.005	0.003	0.006	0.003	0.005	0.002	0.004	0.003	0.005	0.025	0.004	0.002	0.007
Ca	0.926	0.903	0.929	0.883	0.924	0.918	0.903	0.899	0.915	0.839	0.886	0.891	0.796	0.9	0.871	0.911
Na	0.041	0.041	0.036	0.028	0.045	0.043	0.029	0.035	0.029	0.03	0.046	0.037	0.169	0.042	0.031	0.072
K	0.001	0	0	0	0.002	0.002	0.003	0	0	0	0.001	0	0	0	0	0.001
Octa	2.04	2.02	2.03	2.02	2.04	2.03	2.02	2.04	2.02	2.01	2.01	2.02	2.03	2.02	2	2.05
<i>Pourcentages moléculaires</i>																
Wo	49.33	49.29	49.92	46.60	50.35	49.84	47.75	47.37	47.83	44.44	49.22	47.55	43.88	48.67	45.84	50.11
En	37.88	38.05	37.08	40.74	35.86	36.10	39.19	38.51	41.04	44.33	38.67	41.78	29.38	40.08	44.89	31.85
Fe	12.79	12.66	13.00	12.66	13.79	14.06	13.06	14.12	11.13	11.23	12.11	10.67	26.74	11.25	9.26	18.04
mg*	86.92	81.43	81.08	79.02	81.23	79.93	80.11	79.28	83.69	83.53	83.15	83.56	59.22	85.66	87.31	71.75

**La Palisse, entablement**

	St Arcons, sommet du prisme				St Arcons, base du prisme			
67	08tb 37-zone2-px1-bord	75	sta-2-2A-zone1-px6	80	sta-4-6A-px3			
68	08tb 37-zone2-px2-coeur	76	sta-2-2A-zone1-px1	81	sta-4-6A-px2			
69	08tb 37-zone2-px2-bord	77	sta-2-2A-zone1-px4	82	sta-4-6A-px6			
70	08tb 37-zone2-px3-coeur	78	sta-2-2A-zone1-px3					
71	08tb 37-zone2-px3-bord	79	sta-2-2A-zone1-px2					
72	08tb 37-zone2-px4-micro							
73	08tb 37-zone2-px5-micro							
74	08tb 37-zone2-px6-micro							

Clinopyroxènes Ca(Mg,Fe)Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>

N°	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98
% poids d'oxydes																
SiO <sub>2</sub>	45.44	50.73	46.95	40.89	46.45	45.14	42.83	45.04	46.42	47.66	46.44	44.65	42.74	46.06	44.92	50.67
MgO	12.53	15.10	12.16	6.79	10.71	11.51	9.12	10.37	12.30	13.29	12.69	11.56	9.86	11.60	12.09	14.36
FeO	7.30	5.89	7.55	13.14	9.66	8.45	11.09	9.94	7.51	5.41	6.45	7.64	9.71	7.90	7.69	6.29
Na <sub>2</sub> O	0.51	0.46	0.66	1.21	0.91	0.54	0.98	0.98	0.46	0.62	0.59	0.49	0.92	0.56	0.51	0.49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.57	3.77	6.58	10.62	7.03	8.49	9.67	7.71	7.14	6.93	7.30	8.30	10.58	6.99	7.96	4.05
K <sub>2</sub> O	0.03	0.01	0.07	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00
CaO	23.04	22.40	22.92	21.35	22.44	22.48	21.85	22.16	22.88	22.13	22.47	22.71	21.29	22.67	23.17	22.23
MnO	0.09	0.17	0.16	0.28	0.18	0.11	0.22	0.21	0.07	0.12	0.09	0.09	0.14	0.12	0.15	0.12
TiO <sub>2</sub>	2.96	1.30	3.02	5.11	1.97	3.34	3.42	2.67	2.59	2.01	2.61	3.35	4.17	3.18	3.28	1.37
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.11	0.29	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.19	1.02	0.27	0.22	0.01	0.00	0.24	0.09
Total	99.59	100.12	100.08	99.41	99.36	100.07	99.17	99.08	99.56	99.21	98.95	99.02	99.43	99.09	100.04	99.69

## Nombres d'ions sur la base de 6 oxygènes

Si	1.716	1.873	1.762	1.597	1.77	1.701	1.654	1.728	1.749	1.781	1.751	1.698	1.632	1.748	1.695	1.88
Al_Oc	0.052	0.038	0.053	0.086	0.086	0.078	0.095	0.077	0.066	0.086	0.076	0.07	0.108	0.061	0.048	0.057
Al_Tt	0.284	0.127	0.238	0.403	0.23	0.299	0.346	0.272	0.251	0.219	0.249	0.302	0.368	0.252	0.305	0.12
Cr	0.003	0.008	0	0	0	0	0	0	0.006	0.03	0.008	0.007	0	0	0.007	0.003
Fe <sup>3+</sup>	0.102	0.05	0.066	0.111	0.098	0.072	0.125	0.114	0.072	0.067	0.069	0.077	0.089	0.051	0.11	0.023
Ti	0.084	0.036	0.085	0.15	0.057	0.095	0.099	0.077	0.073	0.056	0.074	0.096	0.12	0.091	0.093	0.038
Mg	0.706	0.832	0.68	0.395	0.608	0.646	0.525	0.593	0.691	0.74	0.714	0.656	0.561	0.656	0.68	0.794
Fe <sup>2+</sup>	0.128	0.132	0.171	0.319	0.21	0.194	0.233	0.205	0.165	0.102	0.134	0.166	0.221	0.2	0.133	0.173
Mn	0.003	0.005	0.005	0.009	0.006	0.004	0.007	0.007	0.002	0.004	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005	0.004
Ca	0.932	0.886	0.922	0.894	0.916	0.907	0.905	0.911	0.924	0.886	0.908	0.925	0.871	0.922	0.936	0.883
Na	0.037	0.033	0.048	0.092	0.067	0.04	0.073	0.073	0.034	0.045	0.043	0.036	0.068	0.041	0.037	0.036
K	0.001	0	0.004	0.001	0	0	0	0	0	0.001	0.002	0	0.001	0	0.001	0
Octa	2.05	2.01	2.03	2.06	2.05	2.04	2.06	2.06	2.03	1.99	2.02	2.03	2.04	2.03	2.04	2.01

## Pourcentages moléculaires

Wo	49.79	46.51	50.00	51.77	49.84	49.75	50.42	49.78	49.84	49.25	49.67	50.63	49.89	50.30	50.21	47.07
En	37.71	43.67	36.88	22.87	33.08	35.44	29.25	32.40	37.27	41.13	39.06	35.91	32.13	35.79	36.48	42.32
Fe	12.50	9.82	13.12	25.36	17.08	14.81	20.33	17.81	12.89	9.62	11.27	13.46	17.98	13.91	13.30	10.61
mg*	84.35	85.86	79.44	54.63	73.79	76.54	68.63	73.66	80.54	87.47	83.90	79.52	71.37	76.28	83.13	81.77

## St Arcons, base du prisme

83	sta-4-6A-px5
84	sta-4-6A-px7
85	sta-4-6-px8
86	sta-4-6A-px6-coeurbis3
87	sta-4-6A-px6-intermed
88	sta-4-6A-px6-bordbis

## St Arcons, colonnade, centre du prisme

89	sta-FIB-px1-coeur
90	sta-FIB-px1-intermed
91	sta-FIB-px1-bord
92	sta-FIB-px2-coeur
93	sta-FIB-px2-bord
94	sta-FIB-px2-bordbis
95	sta-FIB-px3-coeur
96	sta-FIB-px3-bordbis
97	sta-FIB-px6-micro

## St Arcons, colonnade, centre du prisme

98	sta-FIB-px4
----	-------------

**Clinopyroxènes Ca(Mg,Fe)Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>**

N°	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114
<i>% poids d'oxydes</i>																
SiO <sub>2</sub>	42.25	48.94	48.14	46.63	47.49	43.76	50.34	45.59	46.26	43.85	43.07	47.63	50.14	44.92	43.49	41.36
MgO	10.35	14.10	13.56	12.52	12.40	11.10	15.12	12.04	12.34	12.02	10.57	13.06	14.77	11.45	10.49	9.99
FeO	8.61	5.59	6.34	7.54	7.27	8.47	5.80	7.84	8.50	8.18	8.75	8.07	6.03	7.38	8.38	8.96
Na <sub>2</sub> O	0.65	0.51	0.57	0.49	0.60	0.65	0.41	0.51	0.65	0.52	0.64	0.48	0.44	0.58	0.62	0.66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.99	5.85	6.78	6.94	5.90	8.22	3.85	7.81	7.30	9.46	9.22	5.66	4.06	8.16	9.19	10.19
K <sub>2</sub> O	0.03	0.03	0.00	0.04	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.04	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
CaO	22.56	22.54	22.42	22.36	22.58	22.56	22.45	22.52	21.48	21.39	22.36	22.37	22.58	22.89	22.56	22.22
MnO	0.16	0.09	0.11	0.11	0.13	0.18	0.11	0.11	0.11	0.15	0.11	0.18	0.10	0.09	0.11	0.14
TiO <sub>2</sub>	4.89	1.86	1.64	2.39	2.70	4.09	1.38	2.82	2.52	3.34	4.48	2.39	1.27	3.85	4.67	5.43
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.16	0.45	0.15	0.03	0.00	0.41	0.00	0.02	0.09	0.02	0.02	0.30	0.05	0.05	0.05
Total	99.48	99.68	100.01	99.17	99.12	99.04	99.87	99.27	99.20	99.00	99.24	99.88	99.72	99.40	99.60	99.05
<i>Nombres d'ions sur la base de 6 oxygènes</i>																
Si	1.614	1.816	1.789	1.761	1.792	1.674	1.864	1.726	1.751	1.667	1.646	1.79	1.863	1.7	1.653	1.591
Al <sub>Oc</sub>	0.063	0.072	0.086	0.071	0.055	0.045	0.033	0.075	0.077	0.09	0.062	0.04	0.04	0.064	0.065	0.053
Al <sub>Tt</sub>	0.386	0.184	0.211	0.239	0.208	0.326	0.136	0.274	0.249	0.333	0.354	0.21	0.137	0.3	0.347	0.409
Cr	0	0.005	0.013	0.005	0.001	0	0.012	0	0.001	0.003	0.001	0.001	0.009	0.001	0.001	0.001
Fe <sup>3+</sup>	0.092	0.046	0.075	0.07	0.044	0.094	0.056	0.077	0.077	0.09	0.084	0.071	0.059	0.061	0.063	0.093
Ti	0.141	0.052	0.046	0.068	0.077	0.118	0.039	0.08	0.072	0.096	0.129	0.067	0.036	0.11	0.133	0.157
Mg	0.589	0.78	0.751	0.705	0.698	0.633	0.835	0.68	0.696	0.681	0.602	0.731	0.818	0.646	0.595	0.573
Fe <sup>2+</sup>	0.183	0.128	0.122	0.168	0.186	0.177	0.124	0.171	0.192	0.17	0.196	0.182	0.128	0.173	0.203	0.196
Mn	0.005	0.003	0.003	0.003	0.004	0.006	0.003	0.003	0.004	0.005	0.003	0.006	0.003	0.003	0.004	0.005
Ca	0.923	0.897	0.893	0.905	0.913	0.925	0.891	0.914	0.871	0.871	0.916	0.9	0.899	0.928	0.919	0.916
Na	0.048	0.037	0.041	0.036	0.044	0.048	0.029	0.038	0.048	0.038	0.047	0.035	0.032	0.042	0.045	0.049
K	0.002	0.001	0	0.002	0	0.001	0	0.001	0.001	0	0.002	0.001	0.001	0.002	0.003	0.002
Octa	2.05	2.02	2.02	2.03	2.02	2.05	2.01	2.04	2.04	2.04	2.04	2.03	2.02	2.03	2.03	2.04
<i>Pourcentages moléculaires</i>																
Wo	51.51	48.38	48.43	48.89	49.49	50.41	46.67	49.54	47.34	47.94	50.86	47.59	47.14	51.27	51.51	51.40
En	32.87	42.07	40.73	38.09	37.83	34.50	43.74	36.86	37.83	37.48	33.43	38.66	42.89	35.69	33.35	32.15
Fe	15.63	9.55	10.85	13.02	12.68	15.10	9.59	13.60	14.84	14.58	15.71	13.75	9.96	13.04	15.13	16.44
mg*	75.80	85.62	85.73	80.48	78.60	77.57	86.80	79.63	78.03	79.56	75.16	79.54	86.20	78.59	74.19	74.03
<i>St Arcons, colonnade, centre du prisme</i>																
99	sta-F1B-px5-micro		100	sta-F1A-zone1-px1-coeur	105	sta-F1A-zone1-px3-coeur										
			101	sta-F1A-zone1-px1-intermed	106	sta-F1A-zone1-px3-bord										
			102	sta-F1A-zone1-px1-bord	107	sta-F1A-zone1-px4-micro										
			103	sta-F1A-zone1-px2-coeur	108	sta-F1A-zone1-px7-coeur										
			104	sta-F1A-zone1-px2-bord	109	sta-F1A-zone1-px7-bord										
					110	sta-F1A-zone1-px5-micro										
					111	sta-F1A-zone1-px6-micro										
<i>St Arcons, colonnade, bord du prisme</i>																
99			100	sta-F1A-zone1-px1-coeur	105	sta-F1A-zone1-px3-coeur										
			101	sta-F1A-zone1-px1-intermed	106	sta-F1A-zone1-px3-bord										
			102	sta-F1A-zone1-px1-bord	107	sta-F1A-zone1-px4-micro										
			103	sta-F1A-zone1-px2-coeur	108	sta-F1A-zone1-px7-coeur										
			104	sta-F1A-zone1-px2-bord	109	sta-F1A-zone1-px7-bord										
					110	sta-F1A-zone1-px5-micro										
					111	sta-F1A-zone1-px6-micro										
<i>St Arcons, colonnade, prisme zone</i>																
99			112	stab1-zone2-px1												
			113	stab1-zone2-px2												
			114	stab1-zone3-px1												

Clinopyroxènes Ca(Mg,Fe)Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>				Olivines (Mg,Fe) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>															
N°	115	116	117	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
% poids d'oxydes				% poids d'oxydes															
SiO <sub>2</sub>	44.15	40.34	41.09	SiO <sub>2</sub>	39.68	39.79	39.30	39.34	39.06	39.52	38.36	37.81	38.11	37.27	39.76	39.72			
MgO	10.73	10.04	9.88	MgO	43.97	43.55	41.91	41.88	41.81	40.65	36.78	36.32	36.03	35.33	43.45	43.29			
FeO	7.98	9.08	9.12	FeO	16.32	16.05	18.91	18.10	18.12	19.33	24.40	23.57	24.66	25.10	16.23	16.47			
Na <sub>2</sub> O	0.60	0.57	0.54	Na <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.00	0.03	0.01	0.03	0.02	0.03	0.00			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.68	10.41	10.44	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.05	0.03	0.05	0.03	0.00	0.04	0.06	0.01	0.03	0.03	0.02			
K <sub>2</sub> O	0.02	0.07	0.05	K <sub>2</sub> O	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.02			
CaO	22.75	22.12	22.64	CaO	0.18	0.22	0.37	0.34	0.36	0.38	0.41	0.41	0.46	0.46	0.25	0.18			
MnO	0.16	0.14	0.12	MnO	0.25	0.17	0.34	0.30	0.39	0.37	0.59	0.61	0.56	0.63	0.22	0.22			
TiO <sub>2</sub>	4.31	6.11	6.07	TiO <sub>2</sub>	0.05	0.00	0.04	0.00	0.04	0.03	0.00	0.01	0.07	0.01	0.02	0.07			
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.11	0.07	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.04	0.02	0.01			
Total	99.41	98.98	100.01	Total	100.71	100.01	101.09	100.23	99.98	100.43	100.71	98.93	100.05	98.93	100.16	100.15			
Nombres d'ions sur la base de 6 oxygènes				Nombres d'ions sur la base de 4 oxygènes															
Si	1.677	1.558	1.569	Si	0.996	1.004	0.996	1.001	0.998	1.009	1.002	1.004	1.004	0.998	1.003	1.003			
Al_Oc	0.066	0.032	0.039	Al	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0	0.001	0.002	0	0.001	0.001	0.001			
Al_Tt	0.323	0.442	0.431	Ti	0.001	0	0.001	0	0.001	0.001	0	0	0.001	0	0	0.001			
Cr	0.001	0.003	0.002	Fe	0.343	0.339	0.401	0.385	0.387	0.413	0.533	0.523	0.544	0.562	0.342	0.348			
Fe <sup>3+</sup>	0.056	0.102	0.085	Mg	1.646	1.638	1.583	1.589	1.592	1.547	1.433	1.437	1.415	1.41	1.634	1.629			
Ti	0.123	0.177	0.174	Mn	0.005	0.004	0.007	0.007	0.008	0.008	0.013	0.014	0.013	0.014	0.005	0.005			
Mg	0.607	0.578	0.563	Ca	0.005	0.006	0.01	0.009	0.01	0.01	0.012	0.012	0.013	0.013	0.007	0.005			
Fe <sup>2+</sup>	0.198	0.191	0.206	somme	3.002	2.997	3.003	2.997	3.001	2.991	2.998	2.996	2.994	3.001	2.996	2.996			
Mn	0.005	0.005	0.004																
Ca	0.926	0.915	0.926																
Na	0.044	0.043	0.04																
K	0.001	0.003	0.002																
Octa	2.03	2.05	2.04																
Pourcentages moléculaires				Pourcentages moléculaires															
Wo	51.67	51.09	51.91	Fo	82.76	82.85	79.79	80.50	80.44	78.93	72.89	73.32	72.23	71.50	82.69	82.40			
En	33.87	32.27	31.56	Fa	17.24	17.15	20.21	19.50	19.56	21.07	27.11	26.68	27.77	28.50	17.31	17.60			
Fe	14.45	16.64	16.54																
mg*	74.94	74.68	72.83																
St Arcons, colonnade, prisme zoné				La Palisse, colonnade															
115	stab1-zone3-px2			1	08TB14B zone1-olivine1-coeur	10	08TB14B zone1-olivine2-bord										La Palisse, colonnade, bord prisme		
116	stab1-zone1-px1			2	08TB14B zone1-olivine4-coeur											11	07TB02-zone1-ol2-coeur		
117	stab1-zone1-px2			3	08TB14B zone1-olivine3-coeur											12	07TB02-zone1-olivine1-coeur		
				4	08TB14B zone1-olivine4-bord														
				5	08TB14B zone1-olivine2-coeur														
				6	08TB14B zone1-olivine5-coeur														
				7	08TB14B zone1-olivine5-bord														
				8	08TB14B zone1-olivine1-bord														
				9	08TB14B zone1-olivine3-bord														

**Olivines (Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>**

N°	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
<i>% poids d'oxydes</i>																
SiO <sub>2</sub>	39.30	39.37	38.24	38.16	39.65	39.28	38.86	38.31	40.00	37.68	38.56	37.58	37.85	36.97	37.98	37.62
MgO	42.78	41.19	37.97	36.42	43.17	41.50	39.10	36.43	44.37	36.06	37.93	33.26	35.02	32.21	35.27	33.90
FeO	17.33	18.78	22.26	25.07	17.10	18.46	21.73	23.82	15.97	24.87	23.91	28.26	26.47	29.45	25.98	27.46
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.02	0.00	0.02	0.04	0.03	0.04	0.05	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04	0.02	0.01	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.05	0.05	0.03	0.03	0.01	0.07	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.06	0.04	0.00	0.02
K <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
CaO	0.20	0.24	0.42	0.47	0.32	0.24	0.36	0.43	0.23	0.43	0.32	0.45	0.49	0.42	0.41	0.41
MnO	0.22	0.37	0.51	0.61	0.32	0.37	0.53	0.53	0.19	0.60	0.62	0.79	0.70	0.79	0.55	0.72
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.06	0.06	0.01	0.04	0.04	0.07	0.11	0.00	0.07	0.03	0.04	0.03	0.06	0.07	0.08
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.03	0.07	0.00	0.02	0.00	0.05	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.99	100.28	99.70	100.86	100.83	100.07	100.93	99.74	100.87	99.74	101.41	100.40	100.66	99.97	100.28	100.23
<i>Nombres d'ions sur la base de 4 oxygènes</i>																
Si	0.999	1.004	1	0.999	0.998	1.003	1	1.008	1	0.998	0.997	1.005	1	1	1.004	1.003
Al	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0	0.001
Ti	0	0.001	0.001	0	0.001	0.001	0.001	0.002	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002
Fe	0.368	0.401	0.487	0.549	0.36	0.394	0.468	0.524	0.334	0.551	0.517	0.632	0.585	0.666	0.574	0.613
Mg	1.62	1.567	1.48	1.422	1.621	1.58	1.5	1.429	1.653	1.424	1.463	1.325	1.38	1.299	1.39	1.348
Mn	0.005	0.008	0.011	0.014	0.007	0.008	0.012	0.012	0.004	0.013	0.014	0.018	0.016	0.018	0.012	0.016
Ca	0.005	0.007	0.012	0.013	0.009	0.007	0.01	0.012	0.006	0.012	0.009	0.013	0.014	0.012	0.012	0.012
somme	3	2.994	2.998	3	3.002	2.997	2.999	2.991	3	3	3.003	2.995	3	2.998	2.993	2.995

*Pourcentages moléculaires*

Fo	81.49	79.62	75.24	72.15	81.83	80.04	76.22	73.17	83.19	72.10	73.89	67.71	70.23	66.11	70.77	68.74
Fa	18.51	20.38	24.76	27.85	18.17	19.96	23.78	26.83	16.81	27.90	26.11	32.29	29.77	33.89	29.23	31.26

La Palisse, colonnade, bord prisme			La Palisse, colonnade centre prisme			La Palisse, zone à débit planaire		
13	07TB02-zone1-olivine1-bord	17	07TB05-zone2-ol1-coeur	21	08tb60-ol5-coeur	21	08tb60-ol5-coeur	
14	07TB02-zone1-ol3-coeur	18	07TB05-zone2-ol2-coeur	22	08tb60-ol5-bord	22	08tb60-ol5-bord	
15	07TB02-zone1-ol3-bord	19	07TB05-zone2-ol1-bord	23	08tb60-zone1-ol1-coeur	23	08tb60-zone1-ol1-coeur	
16	07TB02-zone1-ol2-bord	20	07TB05-zone2-ol2-bord	24	08tb60-zone1-ol1-bord	24	08tb60-zone1-ol1-bord	
				25	08tb60-zone1-ol2-coeur	25	08tb60-zone1-ol2-coeur	
				26	08tb60-zone1-ol2-bord	26	08tb60-zone1-ol2-bord	
				27	08tb60-zone1-ol3-coeur	27	08tb60-zone1-ol3-coeur	
				28	08tb60-zone1-ol3-bord	28	08tb60-zone1-ol3-bord	



**Olivines (Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>**

N°	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
<i>% poids d'oxydes</i>																
SiO <sub>2</sub>	38.74	38.32	39.59	40.01	39.48	38.19	39.73	39.61	38.83	38.22	39.80	39.18	39.67	39.03	38.87	39.17
MgO	37.99	35.88	43.31	43.68	42.95	36.46	43.57	41.67	40.40	36.45	43.77	39.87	43.25	38.97	39.74	40.33
FeO	22.81	25.40	16.73	16.91	17.10	24.55	16.57	18.57	20.47	24.53	15.90	20.21	17.02	20.75	20.61	20.02
Na <sub>2</sub> O	0.06	0.00	0.03	0.04	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.03	0.01	0.02	0.00	0.03	0.02	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.01	0.02	0.00	0.02	0.03	0.04	0.06	0.03	0.02	0.01	0.05	0.04	0.00	0.00	0.04
K <sub>2</sub> O	0.00	0.07	0.01	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02
CaO	0.35	0.45	0.30	0.28	0.29	0.39	0.25	0.36	0.32	0.46	0.23	0.34	0.29	0.44	0.19	0.33
MnO	0.43	0.61	0.27	0.30	0.28	0.64	0.26	0.39	0.36	0.55	0.23	0.42	0.27	0.41	0.44	0.44
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.07	0.05	0.03	0.00	0.04	0.06	0.03	0.00	0.07	0.01	0.05	0.00	0.01	0.01	0.01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.02	0.04	0.00	0.03	0.04	0.06	0.02	0.03	0.02	0.08	0.06	0.05	0.03	0.04	0.07
Total	100.43	100.84	100.35	101.25	100.17	100.39	100.58	100.72	100.46	100.39	100.06	100.19	100.60	99.69	99.92	100.43
<i>Nombres d'ions sur la base de 4 oxygènes</i>																
Si	1.006	1.005	0.999	1.001	1	1.002	0.999	1.004	0.997	1.003	1.003	1.007	1	1.011	1.004	1.004
Al	0.001	0	0.001	0	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0	0.002	0.001	0	0	0.001
Ti	0	0.001	0.001	0.001	0	0.001	0.001	0.001	0	0.001	0	0.001	0	0	0	0
Fe	0.495	0.557	0.353	0.354	0.362	0.539	0.349	0.394	0.44	0.538	0.335	0.434	0.359	0.449	0.445	0.429
Mg	1.47	1.402	1.63	1.629	1.622	1.426	1.634	1.575	1.547	1.426	1.644	1.527	1.625	1.505	1.53	1.541
Mn	0.009	0.014	0.006	0.006	0.006	0.014	0.005	0.008	0.008	0.012	0.005	0.009	0.006	0.009	0.01	0.01
Ca	0.01	0.013	0.008	0.008	0.008	0.011	0.007	0.01	0.009	0.013	0.006	0.009	0.008	0.012	0.005	0.009
somme	2.994	2.994	3	3.001	3.001	2.997	2.999	2.994	3.003	2.997	2.996	2.991	3	2.99	2.996	2.996

*Pourcentages moléculaires*

Fo	74.81	71.57	82.20	82.15	81.75	72.57	82.40	79.99	77.86	72.61	83.07	77.87	81.91	77.02	77.47	78.22
Fa	25.19	28.43	17.80	17.85	18.25	27.43	17.60	20.01	22.14	27.39	16.93	22.13	18.09	22.98	22.53	21.78

<u>La Palisse, zone à débit planaire</u>		<u>La Palisse, pseudo-colonnade</u>		<u>La Palisse, entablement</u>		<u>La Palisse, entablement</u>	
29	08tb60-zone1-ol4-coeur	31	08tb50b-zone2-ol1-coeur	39	08tb37-zone2-ol1-coeur	43	08tb37-zone2-ol3-coeur
30	08tb60-zone1-ol4-bord	32	08tb50b-zone2-ol1-bord	40	08tb37-zone2-ol1-bord	44	08tb37-zone2-ol3-bord
		33	08tb50b-zone2-ol2-coeur	41	08tb37-zone2-ol2-coeur		
		34	08tb50b-zone2-ol2-bord	42	08tb37-zone2-ol2-bord		
		35	08tb50b-zone2-ol3-coeur				
		36	08tb50b-zone2-ol3-bord				
		37	08tb50b-zone2-ol4-coeur				
		38	08tb50b-zone2-ol4-bord				

**Olivines (Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>**

N°	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	60	61	62
<i>% poids d'oxydes</i>																
SiO <sub>2</sub>	39.22	38.67	40.52	38.56	40.26	38.33	40.17	40.11	38.22	40.31	38.11	39.77	39.19	40.14	37.96	39.74
MgO	42.96	39.33	45.49	37.82	45.37	36.52	44.49	44.84	38.11	45.52	35.89	44.72	40.72	44.71	34.50	42.77
FeO	16.21	20.56	13.94	23.48	14.69	24.80	15.20	15.07	22.83	14.63	25.53	15.05	19.95	15.39	26.66	16.71
Na <sub>2</sub> O	0.02	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.02	0.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.00	0.04	0.02	0.05	0.00	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.00
K <sub>2</sub> O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.03	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00
CaO	0.24	0.30	0.22	0.39	0.23	0.43	0.26	0.24	0.39	0.17	0.45	0.29	0.36	0.26	0.48	0.26
MnO	0.27	0.41	0.19	0.45	0.20	0.62	0.25	0.18	0.58	0.18	0.60	0.25	0.41	0.21	0.68	0.28
TiO <sub>2</sub>	0.03	0.00	0.07	0.00	0.01	0.01	0.04	0.04	0.06	0.00	0.03	0.05	0.03	0.00	0.04	0.03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.03	0.00	0.05	0.02	0.02	0.08	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.04	0.06	0.02	0.02
Total	99.02	99.35	100.50	100.79	100.84	100.74	100.54	100.52	100.30	100.82	100.67	100.21	100.72	100.83	100.40	99.85
<i>Nombres d'ions sur la base de 4 oxygènes</i>																
Si	1.001	1.005	1.006	1.001	1	1.003	1.004	1.002	0.996	1.001	1.002	0.997	1.001	1.001	1.006	1.007
Al	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0	0.001	0.001	0.002	0	0.001	0.001	0	0	0	0
Ti	0.001	0	0.001	0	0	0	0.001	0.001	0.001	0	0.001	0.001	0.001	0	0.001	0.001
Fe	0.346	0.447	0.289	0.51	0.305	0.543	0.318	0.315	0.498	0.304	0.561	0.316	0.426	0.321	0.591	0.354
Mg	1.635	1.523	1.684	1.464	1.68	1.424	1.657	1.669	1.481	1.685	1.406	1.672	1.55	1.662	1.363	1.616
Mn	0.006	0.009	0.004	0.01	0.004	0.014	0.005	0.004	0.013	0.004	0.013	0.005	0.009	0.004	0.015	0.006
Ca	0.007	0.008	0.006	0.011	0.006	0.012	0.007	0.006	0.011	0.005	0.013	0.008	0.01	0.007	0.014	0.007
somme	2.998	2.994	2.992	2.998	2.997	2.997	2.995	2.998	3.004	2.999	2.998	3	2.999	2.998	2.991	2.993

*Pourcentages moléculaires*

Fo	82.53	77.31	85.35	74.16	84.63	72.39	83.90	84.12	74.84	84.72	71.48	84.10	78.44	83.81	69.75	82.03
Fa	17.47	22.69	14.65	25.84	15.37	27.61	16.10	15.88	25.16	15.28	28.52	15.90	21.56	16.19	30.25	17.97

**La Palisse, entablement**

		St Arcons, sommet du prisme			St Arcons, base du prisme		
45	08tb37-zone2-ol4-coeur	47	sta-2-2A-zone1-ol1-coeur		56	sta-4-6A-ol1-coeur	
46	08tb37-zone2-ol4-bord	48	sta-2-2A-zone1-ol4-bord		57	sta-4-6A-ol1-bord	
		49	sta-2-2A-zone1-ol4-coeur		60	sta-4-6A-ol3-coeur	
		50	sta-2-2A-zone1-ol4-bord		61	sta-4-6A-ol3-bord	
		51	sta-2-2A-zone1-ol1-bord		62	sta-4-6A-ol4-coeur	
		52	sta-2-2A-zone1-ol2-coeur				
		53	sta-2-2A-zone1-ol2-bord				
		54	sta-2-2A-zone1-ol3-coeur				
		55	sta-2-2A-zone1-ol3-bord				

Olivines (Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>

N°	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78
% poids d'oxydes																
SiO <sub>2</sub>	37.31	40.25	38.35	40.21	39.43	40.46	38.68	40.23	38.07	40.10	37.61	38.80	38.71	40.13	39.29	40.69
MgO	32.29	45.42	35.93	45.71	42.20	46.34	37.15	45.44	36.51	44.86	33.92	39.58	38.82	45.20	41.79	46.19
FeO	29.45	14.26	24.61	13.78	18.18	12.73	23.99	13.27	25.02	14.44	27.75	21.77	22.04	13.99	18.65	12.85
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.07	0.02	0.04	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.03	0.04	0.03	0.02	0.07	0.01	0.02	0.05	0.05	0.01	0.00	0.03	0.04	0.01	0.04
K <sub>2</sub> O	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01
CaO	0.48	0.20	0.39	0.22	0.28	0.17	0.39	0.13	0.43	0.22	0.47	0.32	0.40	0.07	0.31	0.18
MnO	0.80	0.20	0.55	0.20	0.38	0.19	0.51	0.22	0.61	0.19	0.72	0.45	0.46	0.22	0.27	0.19
TiO <sub>2</sub>	0.07	0.04	0.06	0.06	0.06	0.01	0.05	0.00	0.08	0.00	0.03	0.04	0.05	0.00	0.00	0.00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	0.02	0.00	0.04	0.06	0.04	0.00	0.03	0.00	0.00	0.04	0.04	0.06	0.01	0.00	0.03
Total	100.49	100.42	100.01	100.27	100.64	100.03	100.78	99.37	100.78	99.88	100.57	101.01	100.57	99.67	100.34	100.17

Nombres d'ions sur la base de 4 oxygènes

Si	1.003	1.002	1.01	1.001	0.999	1.004	1.006	1.008	0.997	1.005	1.001	0.997	1.001	1.005	1.001	1.008
Al	0.001	0.001	0.001	0.001	0	0.002	0	0.001	0.002	0.002	0	0	0.001	0.001	0	0.001
Ti	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0	0.001	0	0.001	0	0.001	0.001	0.001	0	0	0
Fe	0.662	0.297	0.542	0.287	0.385	0.264	0.522	0.278	0.548	0.303	0.618	0.468	0.477	0.293	0.397	0.266
Mg	1.294	1.686	1.41	1.696	1.594	1.714	1.441	1.696	1.426	1.676	1.346	1.516	1.496	1.688	1.586	1.706
Mn	0.018	0.004	0.012	0.004	0.008	0.004	0.011	0.005	0.014	0.004	0.016	0.01	0.01	0.005	0.006	0.004
Ca	0.014	0.005	0.011	0.006	0.008	0.005	0.011	0.003	0.012	0.006	0.013	0.009	0.011	0.002	0.008	0.005
somme	2.995	2.996	2.991	2.998	2.998	2.994	2.992	2.993	3.001	2.996	2.998	3.002	2.998	2.994	2.999	2.991

Pourcentages moléculaires

Fo	66.16	85.02	72.23	85.53	80.55	86.65	73.41	85.92	72.24	84.69	68.53	76.41	75.82	85.21	79.98	86.51
Fa	33.84	14.98	27.77	14.47	19.45	13.35	26.59	14.08	27.76	15.31	31.47	23.59	24.18	14.79	20.02	13.49

St Arcons, base du prisme				St Arcons, colonnade, centre du prisme				St Arcons, colonnade, bord du prisme			
63	sta-4-6A-ol4-bord			66	sta-F1B-ol1-coeur			74	sta-F1A-zone1-ol2-coeur		
64	sta-4-6A-ol5-coeur			67	sta-F1B-ol1-bord			75	sta-F1A-zone1-ol2-bord		
65	sta-4-6A-ol5-bord			68	sta-F1B-ol2-coeur			76	sta-F1A-zone1-ol1-coeur		
				69	sta-F1B-ol2-bord			77	sta-F1A-zone1-ol1-bord		
				70	sta-F1B-ol3-coeur			78	sta-F1A-zone1-ol3-coeur		
				71	sta-F1B-ol3-bord						
				72	sta-F1B-ol4-coeur						
				73	sta-F1B-ol4-bord						

# Olivines (Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>

N°	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91
% poids d'oxydes													
SiO <sub>2</sub>	38.08	40.25	40.43	40.31	39.21	40.46	38.56	38.21	37.60	41.16	37.89	39.16	38.60
MgO	37.40	45.57	45.42	46.31	41.11	44.65	36.78	36.39	34.38	48.37	36.15	39.51	37.11
FeO	23.88	13.82	14.33	13.40	19.00	15.54	24.44	25.39	27.95	10.70	25.16	21.45	23.98
Na <sub>2</sub> O	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.03	0.00	0.00	0.02	0.05	0.02	0.00	0.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.04	0.02	0.04	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.04	0.04	0.01
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.05	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02
CaO	0.46	0.18	0.19	0.23	0.27	0.13	0.44	0.52	0.56	0.13	0.53	0.27	0.37
MnO	0.52	0.21	0.16	0.17	0.30	0.18	0.51	0.52	0.58	0.15	0.58	0.39	0.50
TiO <sub>2</sub>	0.05	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.08	0.04	0.03	0.05	0.05	0.10	0.06
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.08	0.05	0.01	0.02	0.04	0.02	0.01	0.03	0.08	0.04	0.00	0.06
Total	100.46	100.19	100.61	100.49	99.95	101.07	100.87	101.18	101.24	100.76	100.48	100.93	100.75

## Nombres d'ions sur la base de 4 oxygènes

Si	0.996	1.003	1.005	0.999	1.004	1.006	1.005	0.998	0.995	1.004	0.997	1.004	1.005
Al	0.001	0.001	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0
Ti	0.001	0	0	0	0	0	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
Fe	0.522	0.288	0.298	0.278	0.407	0.323	0.533	0.555	0.619	0.218	0.554	0.46	0.522
Mg	1.458	1.692	1.682	1.711	1.569	1.655	1.429	1.417	1.357	1.759	1.418	1.51	1.44
Mn	0.011	0.005	0.003	0.004	0.006	0.004	0.011	0.011	0.013	0.003	0.013	0.008	0.011
Ca	0.013	0.005	0.005	0.006	0.007	0.003	0.012	0.015	0.016	0.003	0.015	0.008	0.01
somme	3.004	2.996	2.995	3	2.995	2.995	2.993	3	3.006	2.993	3.002	2.993	2.993

## Pourcentages moléculaires

Fo	73.64	85.45	84.95	86.02	79.40	83.67	72.83	71.86	68.67	88.97	71.91	76.65	73.39
Fa	26.36	14.55	15.05	13.98	20.60	16.33	27.17	28.14	31.33	11.03	28.09	23.35	26.61

## St Arcons, colonnade, bord du prisme

79	sta-F1A-zone1-ol3-bord	84	stab1-zone1-ol1-coeur
80	sta-F1A-zone2-ol4-coeur	85	stab1-zone1-ol1-bord
81	sta-F1A-zone2-ol4-bord	86	stab1-zone1-ol2
82	sta-F1A-zone2-ol5-coeur	87	stab1-zone1-ol3
83	sta-F1A-zone2-ol5-bord	88	stab1-zone2-ol1-coeur
		89	stab1-zone2-ol1-bord
		90	stab1-zone3-ol1-coeur
		91	stab1-zone3-ol1-bord

## St Arcons, colonnade, prisme zoné

84	stab1-zone1-ol1-coeur
85	stab1-zone1-ol1-bord
86	stab1-zone1-ol2
87	stab1-zone1-ol3
88	stab1-zone2-ol1-coeur
89	stab1-zone2-ol1-bord
90	stab1-zone3-ol1-coeur
91	stab1-zone3-ol1-bord

**Plagioclases Na[AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>]- Ca[Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>]**

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<i>% poids d'oxydes</i>																
SiO <sub>2</sub>	54.29	54.56	54.36	55.13	55.56	55.57	54.21	54.51	54.15	54.53	54.86	54.35	54.97	54.61	54.82	54.78
MgO	0.09	0.08	0.06	0.12	0.13	0.08	0.10	0.10	0.03	0.06	0.03	0.06	0.03	0.05	0.04	5.33
FeO	0.68	1.10	0.81	0.88	0.93	0.72	0.84	0.86	0.58	0.59	0.72	0.80	0.60	0.55	0.63	27.62
Na <sub>2</sub> O	5.08	5.09	5.06	5.60	5.78	5.60	5.12	5.28	5.26	5.23	5.48	5.11	5.30	5.05	5.30	0.43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.93	27.71	27.64	26.87	26.77	26.97	27.59	27.07	27.88	27.39	27.41	27.83	27.51	27.60	27.39	10.52
K <sub>2</sub> O	0.40	0.42	0.49	0.57	0.60	0.60	0.48	0.54	0.46	0.52	0.47	0.46	0.51	0.53	0.49	0.03
CaO	10.70	10.61	10.36	9.91	9.66	9.45	10.61	10.45	10.41	10.39	10.37	10.32	9.92	10.51	10.17	0.60
MnO	0.01	0.04	0.00	0.00	0.02	0.02	0.05	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
Total	99.17	99.61	98.78	99.09	99.44	99.02	99.01	98.81	98.79	98.72	99.36	98.93	98.88	98.90	98.84	99.51
<i>Nombres d'ions sur la base de 8 oxygènes</i>																
Si	2.477	2.483	2.490	2.519	2.529	2.533	2.482	2.500	2.480	2.498	2.500	2.485	2.509	2.496	2.506	0.471
Al	1.502	1.487	1.492	1.447	1.436	1.449	1.489	1.464	1.505	1.479	1.472	1.500	1.480	1.487	1.476	0.000
Fe <sup>3+</sup>	0.509	0.489	0.594	0.699	0.556	0.548	0.643	0.725	0.410	0.784	1.187	0.242	1.066	0.546	0.565	0.689
Mg	0.006	0.005	0.004	0.008	0.009	0.005	0.007	0.007	0.002	0.004	0.002	0.004	0.002	0.003	0.003	0.025
Fe <sup>2+</sup>	2.547	2.446	2.968	3.497	2.782	2.740	3.215	3.626	2.052	3.922	5.936	1.208	5.330	2.732	2.825	3.444
Na	0.449	0.449	0.449	0.496	0.510	0.495	0.455	0.470	0.467	0.465	0.484	0.453	0.469	0.448	0.470	0.002
Ca	0.523	0.517	0.508	0.485	0.471	0.462	0.521	0.514	0.511	0.510	0.506	0.506	0.485	0.515	0.498	1.483
K	0.023	0.024	0.029	0.033	0.035	0.035	0.028	0.032	0.027	0.030	0.027	0.027	0.030	0.031	0.029	0.023
somme	8.014	7.876	8.505	9.152	8.294	8.232	8.812	9.306	7.427	9.662	12.087	6.398	11.341	8.228	8.343	5.012

*Pourcentages moléculaires*

An	0.53	0.52	0.52	0.48	0.46	0.47	0.52	0.51	0.51	0.51	0.50	0.51	0.49	0.52	0.50	0.51
Ab	0.45	0.45	0.46	0.49	0.50	0.50	0.45	0.46	0.46	0.46	0.48	0.46	0.48	0.45	0.47	0.47
Or	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02

La Palisse, colonnade			La Palisse, colonnade, bord prisme			La Palisse, colonnade centre prisme			La Palisse, zone à débit planaire		
1	2	3	8	9	10	14	15	16	14	15	16
08tb14b-plagio6			07TB02-zone1-plagio1			07TB05-zone2-plagio2			08tb60-pl6		
08TB14B- zone1-plagio5			07TB02-zone1-plagio2-bis			07TB05-zone2-plagio1					
08TB14B- zone1-plagio2			07TB02-zone1-plagio3								
08TB14B- zone1-plagio4			07TB02-zone1-plagio4								
08TB14B- zone1-plagio1			07TB02-zone1-plagio5								
08TB14B- zone1-plagio3			07TB02-zone1-plagio2								
07TB02-zone1-plagio1-bis											

**Plagioclases Na[AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>]- Ca[Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>]**

N°	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
<i>% poids d'oxydes</i>																
SiO <sub>2</sub>	54.25	54.71	53.61	53.73	54.73	53.80	54.89	55.08	54.33	54.55	53.99	54.27	55.98	53.80	54.39	53.90
MgO	5.29	5.42	4.90	5.13	5.51	5.13	5.48	5.83	5.13	5.20	5.18	5.02	5.49	4.93	5.22	4.80
FeO	27.71	27.83	28.45	28.11	27.85	28.00	27.56	27.61	27.69	28.00	28.25	27.86	26.57	28.00	27.04	28.08
Na <sub>2</sub> O	0.47	0.34	0.27	0.34	0.28	0.31	0.29	0.28	0.30	0.29	0.28	0.51	0.61	0.53	0.54	0.48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.65	10.26	11.33	11.20	10.56	11.16	10.28	10.06	10.52	10.89	11.16	11.01	9.59	11.21	10.36	11.23
K <sub>2</sub> O	0.03	0.05	0.04	0.06	0.03	0.05	0.07	0.05	0.04	0.06	0.08	0.04	0.07	0.03	0.08	0.08
CaO	0.87	0.66	0.78	0.75	0.70	0.81	0.73	0.72	0.61	0.57	0.73	0.70	0.65	0.56	0.93	0.75
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00
Total	99.27	99.28	99.39	99.31	99.68	99.25	99.32	99.63	98.65	99.56	99.67	99.40	98.99	99.10	98.55	99.33
<i>Nombres d'ions sur la base de 8 oxygènes</i>																
Si	0.468	0.479	0.434	0.454	0.485	0.455	0.484	0.513	0.456	0.458	0.457	0.444	0.485	0.438	0.465	0.425
Al	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000
Fe <sup>3+</sup>	#VALEUR!	0.718	0.541	0.551	0.592	0.608	0.763	0.809	0.523	0.461	0.447	0.427	0.416	0.193	0.232	0.189
Mg	0.027	0.020	0.016	0.020	0.016	0.018	0.017	0.016	0.018	0.017	0.016	0.029	0.036	0.031	0.032	0.028
Fe <sup>2+</sup>	#VALEUR!	3.591	2.706	2.756	2.962	3.041	3.816	4.047	2.615	2.306	2.235	2.134	2.082	0.966	1.161	0.946
Na	0.002	0.003	0.003	0.004	0.002	0.003	0.005	0.003	0.003	0.004	0.005	0.002	0.005	0.002	0.006	0.005
Ca	1.492	1.493	1.530	1.514	1.490	1.509	1.478	1.477	1.495	1.500	1.515	1.498	1.427	1.511	1.465	1.511
K	0.033	0.025	0.030	0.029	0.027	0.031	0.028	0.027	0.023	0.022	0.028	0.027	0.025	0.022	0.036	0.029
somme	5.022	5.011	5.013	5.024	5.020	5.023	5.012	5.025	5.001	5.010	5.022	5.013	4.997	5.018	5.015	5.009

*Pourcentages moléculaires*

An	0.51	0.50	0.55	0.54	0.51	0.54	0.50	0.48	0.52	0.53	0.53	0.53	0.47	0.54	0.51	0.55
Ab	0.46	0.48	0.43	0.44	0.48	0.45	0.48	0.50	0.46	0.46	0.45	0.44	0.49	0.43	0.46	0.42
Or	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03
La Palisse, zone à débit planaire																
17	08tb60-zone1-pl1-micro															
18	08tb60-zone1-pl2-micro															
19	08tb60-zone1-pl3-micro															
20	08tb60-zone1-pl4-micro															
21	08tb60-zone1-pl5-micro															
La Palisse, entablement																
22	08tb50b-zone2-pl1-micro															
23	08tb50b-zone2-pl2-micro															
24	08tb50b-zone2-pl3-micro															
25	08tb50b-zone2-pl4-micro															
26	08tb50b-zone2-pl4-micro-bis															
27	08tb50b-zone2-pl5-micro															
28	08tb37-zone2-pl1															
29	08tb37-zone2-pl2															
30	08tb37-zone2-pl2-bis															
31	08tb37-zone2-pl3															
32	08tb37-zone2-pl3-bis															

Plagioclases Na[AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>]- Ca[Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>]

N°	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
% poids d'oxydes																
SiO <sub>2</sub>	54.59	54.90	52.43	52.45	52.99	52.62	51.58	51.76	51.52	53.11	52.07	51.51	55.36	52.58	51.33	51.78
MgO	4.95	5.17	4.10	4.21	4.43	4.21	4.12	4.15	4.05	4.45	3.96	3.89	5.39	4.34	3.74	3.89
FeO	27.98	27.16	29.35	29.09	28.37	29.07	28.60	29.66	29.41	28.66	29.01	29.54	27.24	28.77	29.51	29.05
Na <sub>2</sub> O	0.55	0.57	0.28	0.75	0.35	0.37	0.50	0.32	0.31	0.32	0.28	0.25	0.45	0.35	0.26	0.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.96	10.63	12.72	12.50	11.81	12.13	12.48	12.86	12.80	11.98	12.61	13.08	10.07	12.34	13.27	13.00
K <sub>2</sub> O	0.04	0.06	0.05	0.03	0.02	0.05	0.14	0.05	0.06	0.03	0.06	0.03	0.03	0.04	0.06	0.01
CaO	0.74	0.80	0.60	0.83	0.85	0.81	1.11	0.77	0.86	0.75	0.77	0.77	0.61	0.83	0.99	0.77
MnO	0.03	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
Total	99.84	99.29	99.54	99.88	98.82	99.25	98.54	99.57	99.04	99.31	98.76	99.06	99.15	99.25	99.17	98.77
Nombres d'ions sur la base de 8 oxygènes																
Si	0.436	0.457	0.364	0.373	0.395	0.373	0.370	0.369	0.362	0.394	0.354	0.347	0.476	0.386	0.334	0.348
Al	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Fe <sup>3+</sup>	0.612	0.569	0.733	0.856	0.657	0.094	0.648	0.638	0.379	0.260	0.994	0.938	1.029	0.896	0.861	0.920
Mg	0.032	0.033	0.016	0.044	0.021	0.022	0.030	0.019	0.018	0.019	0.016	0.015	0.026	0.020	0.015	0.014
Fe <sup>2+</sup>	3.062	2.843	3.664	4.282	3.283	0.471	3.241	3.190	1.893	1.299	4.970	4.690	5.144	4.482	4.307	4.599
Na	0.003	0.004	0.003	0.002	0.002	0.003	0.010	0.004	0.004	0.002	0.004	0.002	0.002	0.003	0.004	0.001
Ca	1.497	1.461	1.580	1.567	1.537	1.569	1.563	1.601	1.596	1.545	1.575	1.602	1.462	1.555	1.602	1.579
K	0.028	0.031	0.023	0.032	0.033	0.031	0.043	0.029	0.033	0.029	0.030	0.030	0.023	0.032	0.038	0.030
somme	5.008	5.011	5.004	5.028	5.005	5.003	5.027	5.023	5.019	5.005	4.999	5.011	5.000	5.015	5.011	5.004

Pourcentages moléculaires

An	0.53	0.51	0.62	0.59	0.58	0.60	0.61	0.62	0.62	0.59	0.63	0.64	0.49	0.60	0.65	0.64
Ab	0.44	0.45	0.36	0.36	0.40	0.38	0.36	0.36	0.36	0.39	0.36	0.34	0.48	0.38	0.33	0.35
Or	0.03	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01

La Palisse, entablement		St Arcons, sommet du prisme				St Arcons, base du prisme				St Arcons, colonnade, centre du prisme	
33	08tb37-zone2-pl4	35	36	37	38	42	43	44	45	48	sta-F1B-pl3
34	08tb37-zone2-pl5	35	36	37	38	42	43	44	45	48	
		sta-2-2A-zone1-pl1	sta-2-2A-zone1-pl2	sta-2-2A-zone1-pl3	sta-2-2A-zone1-pl3-bis	sta-4-6A-pl1	sta-4-6A-pl2	sta-4-6A-pl2-bis	sta-4-6A-pl3		
		sta-2-2A-zone1-pl4	sta-2-2A-zone1-pl4	sta-2-2A-zone1-pl4-bis	sta-2-2A-zone1-pl5						



**Plagioclases Na[AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>]- Ca[Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>]**

N°	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
<i>% poids d'oxydes</i>																
SiO <sub>2</sub>	52.58	51.68	51.59	51.92	51.85	51.25	51.58	51.52	51.03	51.48	51.26	51.42	51.81	51.91	51.38	51.50
MgO	4.29	3.75	3.78	3.89	3.92	3.93	3.83	3.77	3.55	3.80	3.78	3.88	3.84	4.00	3.62	3.85
FeO	28.82	29.56	29.38	29.23	29.14	29.14	29.35	29.06	29.85	29.56	29.69	29.72	29.67	29.32	29.56	29.06
Na <sub>2</sub> O	0.31	0.25	0.23	0.34	0.23	0.26	0.24	0.28	0.25	0.28	0.32	0.25	0.31	0.24	0.29	0.30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.26	13.01	12.78	12.58	12.85	12.97	12.75	13.20	13.67	13.00	13.29	12.90	13.18	12.60	13.22	12.87
K <sub>2</sub> O	0.03	0.02	0.06	0.14	0.02	0.00	0.04	0.03	0.01	0.02	0.01	0.00	0.05	0.06	0.03	0.04
CaO	0.81	1.12	0.79	0.81	0.70	0.66	0.64	0.77	0.90	0.89	0.81	0.80	0.71	0.66	0.90	0.91
MnO	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.01
Total	99.13	99.40	98.61	98.92	98.71	98.22	98.42	98.64	99.27	99.04	99.15	98.98	99.57	98.83	99.01	98.54
<i>Nombres d'ions sur la base de 8 oxygènes</i>																
Si	0.382	0.334	0.338	0.347	0.350	0.354	0.343	0.338	0.317	0.339	0.337	0.346	0.340	0.357	0.323	0.346
Al	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000
Fe <sup>3+</sup>	0.494	0.681	0.404	0.692	0.800	0.651	0.653	0.786	0.622	0.436	0.337	0.352	0.543	0.369	0.667	0.461
Mg	0.018	0.015	0.014	0.020	0.014	0.015	0.014	0.016	0.015	0.016	0.019	0.015	0.018	0.014	0.017	0.018
Fe <sup>2+</sup>	2.471	3.407	2.020	3.462	4.001	3.257	3.265	3.931	3.110	2.181	1.684	1.759	2.714	1.847	3.335	2.306
Na	0.002	0.001	0.004	0.010	0.001	0.000	0.003	0.002	0.001	0.002	0.001	0.000	0.003	0.004	0.002	0.003
Ca	1.559	1.599	1.598	1.585	1.583	1.593	1.598	1.583	1.619	1.604	1.611	1.612	1.601	1.590	1.605	1.585
K	0.031	0.043	0.030	0.031	0.027	0.026	0.025	0.030	0.035	0.034	0.031	0.031	0.027	0.026	0.035	0.035
somme	5.009	5.004	4.996	5.002	5.000	5.010	4.997	5.004	5.009	5.005	5.013	5.008	5.007	5.001	5.001	5.008

*Pourcentages moléculaires*

An	0.60	0.65	0.64	0.63	0.64	0.64	0.64	0.65	0.67	0.64	0.65	0.64	0.64	0.63	0.66	0.64
Ab	0.38	0.34	0.34	0.35	0.35	0.35	0.35	0.34	0.32	0.34	0.33	0.35	0.34	0.36	0.33	0.35
Or	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
<i>St Arcons, colonnade, centre du prisme</i>																
49											<i>St Arcons, colonnade, bord du prisme</i>					
50																
51																
	sta-F1B-pl3-bis						52	sta-F1B-pl1-bis			57	sta-F1A-pl				
	sta-F1B-pl4						53	sta-F1B-pl1-ter			58	sta-F1A-pl				
	sta-F1B-pl1						54	sta-F1B-pl2			59	sta-F1A-pl				
							55	sta-F1B-pl			60	sta-F1A-pl				
							56	sta-F1B-pl			61	sta-F1A-pl				
											62	sta-F1A-pl				
											63	sta-F1A-pl				
											64	sta-F1A-pl				

Plagioclases Na[AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>]-Ca[Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>]

N°

65 66 67 68 69 70 71 72 73

*Nombres d'ions sur la base de 8 oxygènes*

Si	0.506	0.332	0.318	0.337	0.335	0.362	0.329	0.321	0.343
Al	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.003	0.002
$^{3+}\text{Fe}$	0.588	0.619	0.626	0.664	0.643	0.408	0.474	0.386	1.105
Mg	0.032	0.012	0.016	0.018	0.016	0.020	0.016	0.018	0.018
$^{2+}\text{Fe}$	2.940	3.094	3.131	3.319	3.215	2.042	2.371	1.930	5.527
Na	0.001	0.003	0.006	0.005	0.005	0.006	0.003	0.005	0.007
Ca	1.429	1.599	1.630	1.593	1.599	1.552	1.594	1.596	1.579
K	0.024	0.034	0.037	0.036	0.025	0.034	0.024	0.026	0.035
omme	5.002	5.006	5.014	5.017	4.994	4.995	4.996	4.999	5.013

### Pourcentages moléculaires

An	0.46	0.66	0.67	0.65	0.64	0.61	0.65	0.66	0.64
Ab	0.51	0.33	0.32	0.33	0.34	0.37	0.33	0.32	0.34
Or	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

St Arcons, colonnade, centre du prisme		St Arcons, colonnade, prisme zoné	
65	sta-F1B-pl	67	stab1-zone1-pl1
66	sta-F1B-pl	68	stab1-zone1-pl2
		69	stab1-zone2-pl1
		70	stab1-zone2-pl2
		71	stab1-zone3-pl1
		72	stab1-zone3-pl1bis
		73	stab1-zone3-pl2

**Tianomagnétites Fe<sub>3-x</sub>Ti<sub>x</sub>O<sub>4</sub>**

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	14	15	17	18	19	20
% poids d'oxydes corrigés *																
SiO2	0.07	0.11	0.16	0.08	0.11	0.11	0.09	0.06	0.10	0.08	0.08	0.23	0.11	0.11	0.14	0.09
TiO2	20.52	20.34	19.86	19.75	19.33	19.33	19.26	19.19	19.11	18.24	14.65	26.03	16.10	20.06	19.48	19.43
Al2O3	3.06	2.94	3.56	4.20	3.34	3.29	3.86	4.35	2.46	4.71	7.12	1.45	6.40	3.28	3.39	4.13
Cr2O3	0.05	0.11	0.11	0.45	0.02	0.07	0.68	1.84	0.09	2.37	8.31	0.10	0.21	0.12	0.10	0.21
Fe2O3	24.65	24.47	24.98	25.66	26.46	26.66	25.90	25.12	27.52	26.40	24.84	14.98	30.16	24.87	26.44	26.32
FeO	45.84	45.76	44.28	44.06	44.42	45.07	43.44	43.69	44.86	42.48	37.03	51.22	36.99	44.52	44.11	43.39
MnO	0.86	0.84	0.84	0.88	0.89	0.96	0.82	0.81	1.04	0.80	0.69	1.01	0.49	0.77	0.74	0.78
MgO	1.78	1.37	2.57	2.86	1.89	1.25	2.84	2.68	1.27	3.09	4.33	1.64	6.18	2.72	2.66	3.26
CaO	0.23	0.12	0.43	0.14	0.29	0.33	0.12	0.14	0.19	0.16	0.02	0.04	0.31	0.42	0.20	0.12
K2O	0.07	0.09	0.07	0.03	0.04	0.07	0.01	0.01	0.05	0.02	0.01	0.04	0.00	0.05	0.05	0.04
Na2O	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.03	0.06	0.06	0.00	0.03	0.08	0.00
Total	97.14	96.14	96.87	98.11	96.80	97.13	97.06	97.89	96.69	98.38	97.14	96.79	96.96	96.95	97.40	97.77

**Nombres d'ions sur la base de 4 oxygènes corrigés**

Si	0.008	0.012	0.016	0.008	0.011	0.011	0.009	0.006	0.011	0.009	0.009	0.022	0.012	0.011	0.014	0.009
Al	0.028	0.015	0.052	0.017	0.036	0.041	0.015	0.017	0.023	0.019	0.002	0.005	0.040	0.051	0.024	0.015
Cr	0.004	0.009	0.009	0.037	0.001	0.005	0.056	0.151	0.008	0.193	0.722	0.008	0.018	0.010	0.008	0.017
Fe3+	0.732	0.737	0.742	0.760	0.791	0.796	0.773	0.747	0.820	0.783	0.761	0.438	0.906	0.735	0.783	0.780
Ti	1.588	1.616	1.537	1.524	1.524	1.524	1.512	1.493	1.506	1.415	1.211	1.876	1.304	1.537	1.506	1.506
Mg	0.272	0.215	0.394	0.438	0.296	0.195	0.443	0.414	0.198	0.475	0.709	0.234	0.992	0.414	0.408	0.501
Fe2+	1.514	1.531	1.462	1.450	1.475	1.495	1.441	1.445	1.486	1.400	1.261	1.664	1.235	1.463	1.451	1.429
Mn	0.075	0.075	0.073	0.076	0.079	0.085	0.073	0.071	0.092	0.070	0.064	0.082	0.045	0.067	0.065	0.068
Ca	0.026	0.014	0.047	0.015	0.033	0.037	0.013	0.015	0.021	0.018	0.002	0.004	0.036	0.046	0.022	0.014
K	0.009	0.012	0.010	0.004	0.006	0.009	0.001	0.001	0.007	0.003	0.002	0.005	0.000	0.006	0.007	0.005
Na	0.000	0.000	0.003	0.001	0.000	0.001	0.009	0.000	0.000	0.005	0.012	0.011	0.000	0.006	0.016	0.000
Somme	4.256	4.237	4.344	4.330	4.251	4.200	4.346	4.360	4.173	4.390	4.756	4.348	4.588	4.346	4.303	4.345

**% moléculaires**

MT	58.7	59.8	58.0	58.1	62.0	63.4	59.3	58.8	64.3	60.7	60.5	35.7	61.5	57.4	60.4	58.7
UVS	41.3	40.2	42.0	41.9	38.0	36.6	40.7	41.2	35.7	39.3	39.5	64.3	38.5	42.6	39.6	41.3
x	0.587	0.598	0.580	0.581	0.620	0.634	0.593	0.588	0.643	0.607	0.605	0.357	0.615	0.574	0.604	0.587

La Palisse, colonnade										La Palisse, colonnade, bord prisme						
1	08TB14B zone1-magnetite7m														18	07TB02-zone1-magnetite4m
2	08TB14B zone1-magnetite1														19	07TB02-zone1-magnetite2m
3	08TB14B zone1-magnetite8m														20	07TB02-zone1-mg8
4	08TB14B zone1-magnetite2															
5	08TB14B zone1-magnetite6m															
6	08TB14B zone1-magnetite9m															
7	08TB14B zone1-magnetite3															
8	08TB14B zone1-magnetite4															
9	08TB14B zone1-magnetite10m															
10	08TB14B zone1-magnetite5															

Tianomagnétites Fe<sub>3-x</sub> Ti<sub>x</sub>O<sub>4</sub>

N°	22	23	24	26	27	28	29	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
% poids d'oxydes corrigés*																	
SiO2	0.32	0.13	0.32	0.16	0.11	0.14	0.10	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.16	0.13	0.33	2.96	0.09
TiO2	19.04	19.00	18.36	19.50	19.34	19.14	18.50	20.32	20.79	20.66	20.76	20.79	21.12	21.36	22.19	19.95	22.53
Al2O3	4.31	3.25	3.31	3.55	3.65	4.58	4.86	3.14	2.77	2.68	2.56	2.50	1.16	1.39	1.14	3.67	3.41
Cr2O3	0.19	0.10	0.09	0.09	0.08	0.75	0.94	1.10	0.68	0.26	0.30	0.30	0.13	0.15	0.18	0.11	0.36
Fe2O3	26.77	26.50	28.26	25.99	25.83	21.65	27.24	25.39	24.88	24.96	25.35	25.15	25.34	24.98	22.47	22.89	17.56
FeO	42.99	43.04	43.81	43.76	43.56	43.02	42.19	44.86	45.71	45.12	45.26	45.33	48.00	47.17	48.30	43.55	46.41
MnO	0.82	0.83	0.89	0.77	0.81	0.79	0.72	0.77	0.83	0.78	0.79	0.90	1.00	0.86	0.84	0.76	1.10
MgO	3.15	2.95	1.57	3.01	2.80	2.98	3.68	3.38	2.86	3.19	3.39	3.14	0.93	2.19	1.37	2.78	1.45
CaO	0.18	0.36	0.29	0.41	0.43	2.62	0.15	0.08	0.13	0.18	0.11	0.10	0.40	0.23	0.23	0.66	0.19
K2O	0.00	0.00	0.10	0.05	0.03	0.04	0.00	0.01	0.01	0.03	0.00	0.06	0.04	0.01	0.09	0.17	0.03
Na2O	0.02	0.05	0.00	0.03	0.05	0.03	0.00	0.03	0.00	0.01	0.02	0.05	0.00	0.05	0.00	0.31	0.04
Total	97.79	96.20	97.00	97.33	96.70	95.72	98.36	99.14	98.72	97.93	98.60	98.39	98.28	98.52	97.13	97.83	93.17
Nombres d'ions sur la base de 4 oxygènes corrigés																	
Si	0.033	0.014	0.034	0.016	0.011	0.013	0.010	0.006	0.007	0.007	0.006	0.007	0.016	0.012	0.032	0.278	0.010
Al	0.021	0.044	0.036	0.050	0.053	0.303	0.018	0.009	0.015	0.021	0.013	0.011	0.045	0.026	0.026	0.074	0.025
Cr	0.016	0.008	0.007	0.008	0.007	0.058	0.077	0.084	0.053	0.020	0.023	0.023	0.010	0.012	0.014	0.008	0.031
Fe3+	0.793	0.790	0.843	0.767	0.769	0.633	0.806	0.734	0.721	0.727	0.732	0.729	0.731	0.717	0.654	0.654	0.546
Ti	1.477	1.490	1.454	1.494	1.509	1.415	1.435	1.489	1.528	1.535	1.518	1.530	1.539	1.538	1.629	1.411	1.862
Mg	0.485	0.459	0.246	0.456	0.433	0.436	0.566	0.492	0.417	0.469	0.491	0.457	0.135	0.312	0.200	0.390	0.237
Fe2+	1.416	1.425	1.453	1.434	1.440	1.398	1.388	1.441	1.472	1.460	1.453	1.460	1.538	1.504	1.562	1.382	1.603
Mn	0.071	0.074	0.080	0.067	0.071	0.066	0.063	0.063	0.069	0.065	0.065	0.074	0.082	0.070	0.069	0.061	0.102
Ca	0.019	0.040	0.033	0.045	0.048	0.276	0.017	0.008	0.014	0.019	0.012	0.010	0.041	0.024	0.024	0.067	0.023
K	0.000	0.000	0.013	0.007	0.004	0.005	0.000	0.001	0.001	0.004	0.000	0.008	0.005	0.001	0.012	0.021	0.004
Na	0.003	0.010	0.000	0.006	0.010	0.006	0.000	0.006	0.000	0.002	0.004	0.010	0.000	0.009	0.000	0.056	0.008
Somme	4.335	4.352	4.199	4.349	4.356	4.609	4.380	4.334	4.296	4.328	4.316	4.320	4.142	4.225	4.221	4.402	4.451
% moléculaires																	
MT	59.9	60.1	65.7	58.8	59.2	52.7	60.2	56.0	56.0	55.5	55.3	55.4	60.4	57.1	55.0	54.5	45.2
UVS	40.1	39.9	34.3	41.2	40.8	47.3	39.8	44.0	44.0	44.5	44.7	44.6	39.6	42.9	45.0	45.5	54.8
x	0.599	0.601	0.657	0.588	0.592	0.527	0.602	0.560	0.560	0.555	0.553	0.554	0.604	0.571	0.550	0.545	0.452

La Palisse, colonnade, bord prisme			La Palisse, colonnade centre prisme			La Palisse, zone à débit planaire			La Palisse, pseudo-colonnade		
21	07TB02-zone1-magnetite1m		26	07TB05-zone2-magnetite2m		33	08tb60-zone1-ox1-coeur		42	08tb50b-zone2-ox1	
22	07TB02-zone1-mg7		27	07TB05-zone2-magnetite1m		34	08tb60-zone1-ox1-bord				
23	07TB02-zone1-magnetite3m		28	07TB05-zone2-mg3		35	08tb60-zone1-ox2-coeur				
24	07TB02-zone1-magnetite5m		29	07TB05-zone2-mg4		36	08tb60-zone1-ox3-coeur				
						37	08tb60-zone1-ox4-coeur				
						38	08tb60-zone1-ox5-micro				
						39	08tb60-zone1-ox6-micro				
						40	08tb60-zone1-ox7-micro				
						41	08tb60-zone1-ox8-micro				

**Tianomagnétites Fe<sub>3-x</sub>Ti<sub>x</sub>O<sub>4</sub>**

N°	43	44	45	46	47	48	49	50	52	53	54	55	56	57	58	59	60
<i>% poids d'oxydes corrigés *</i>																	
SiO <sub>2</sub>	0.11	0.07	0.09	0.16	0.53	1.53	0.15	0.22	0.09	0.08	0.05	0.09	0.21	2.77	0.11	0.08	0.16
TiO <sub>2</sub>	17.81	17.94	18.88	14.27	20.39	23.85	14.69	27.50	15.04	16.34	14.84	16.71	16.84	15.31	20.58	20.11	20.46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.40	5.14	3.94	0.57	3.89	3.83	2.27	1.56	5.96	5.63	6.17	5.38	5.17	5.52	2.97	4.09	2.42
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.25	3.36	1.15	0.01	0.04	0.10	0.12	0.06	3.49	1.49	5.03	0.09	0.21	0.12	0.06	0.02	0.04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28.44	25.41	26.91	37.41	22.39	14.52	36.52	11.64	30.56	30.45	30.09	30.05	29.78	26.26	25.46	25.77	25.24
FeO	43.37	42.47	44.27	42.01	43.34	47.14	42.29	53.62	37.15	39.06	37.40	39.24	39.89	37.72	45.69	44.66	46.25
MnO	0.71	0.83	0.70	0.49	1.16	0.87	0.74	0.87	0.58	0.55	0.53	0.63	0.66	0.61	0.84	0.83	0.89
MgO	1.78	2.48	2.16	0.40	2.84	2.04	0.31	0.55	5.56	4.97	5.51	4.68	4.26	3.92	2.53	2.92	1.55
CaO	0.16	0.16	0.24	0.27	0.25	0.43	0.33	0.32	0.13	0.15	0.13	0.42	0.61	3.26	0.26	0.31	0.36
K <sub>2</sub> O	0.04	0.00	0.00	0.04	0.24	0.14	0.03	0.06	0.00	0.04	0.00	0.07	0.03	0.44	0.01	0.01	0.10
Na <sub>2</sub> O	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.01	0.07	0.04	0.00	0.00	0.00	0.03	0.06	0.00	0.00	0.03
Total	98.11	97.85	98.33	95.61	95.07	94.69	97.46	96.46	98.62	98.75	99.76	97.36	97.69	96.01	98.51	98.80	97.49

*Nombres d'ions sur la base de 4 oxygènes corrigés*

Si	0.011	0.007	0.009	0.017	0.057	0.155	0.016	0.021	0.010	0.008	0.005	0.009	0.022	0.262	0.011	0.008	0.016
Al	0.021	0.020	0.029	0.035	0.031	0.051	0.042	0.036	0.016	0.019	0.016	0.053	0.075	0.363	0.030	0.037	0.043
Cr	0.105	0.281	0.094	0.001	0.003	0.008	0.010	0.004	0.289	0.122	0.407	0.007	0.017	0.009	0.005	0.001	0.003
Fe <sup>3+</sup>	0.851	0.764	0.795	1.116	0.678	0.436	1.086	0.342	0.904	0.900	0.882	0.896	0.882	0.746	0.741	0.754	0.741
Ti	1.419	1.427	1.459	1.172	1.628	1.815	1.197	1.978	1.182	1.280	1.141	1.333	1.321	1.087	1.530	1.515	1.549
Mg	0.281	0.390	0.330	0.065	0.449	0.307	0.050	0.079	0.866	0.771	0.839	0.741	0.662	0.552	0.373	0.436	0.233
Fe <sup>2+</sup>	1.441	1.418	1.454	1.392	1.459	1.574	1.398	1.752	1.222	1.283	1.218	1.301	1.313	1.192	1.478	1.453	1.510
Mn	0.064	0.075	0.061	0.045	0.104	0.075	0.068	0.071	0.051	0.048	0.046	0.057	0.058	0.049	0.070	0.070	0.076
Ca	0.019	0.018	0.026	0.032	0.028	0.047	0.038	0.033	0.015	0.017	0.014	0.048	0.068	0.330	0.028	0.033	0.039
K	0.005	0.000	0.000	0.005	0.033	0.018	0.003	0.007	0.000	0.005	0.000	0.010	0.005	0.053	0.001	0.002	0.013
Na	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.049	0.002	0.012	0.009	0.000	0.000	0.000	0.007	0.012	0.000	0.000	0.005
Somme	4.224	4.400	4.258	3.880	4.471	4.535	3.912	4.334	4.564	4.453	4.570	4.454	4.428	4.655	4.266	4.311	4.228
<i>% moléculaires</i>																	
MT	66.5	61.2	62.9	79.1	51.5	35.3	78.0	32.2	64.9	64.4	64.9	63.8	64.3	63.0	57.9	57.8	60.0
UVS	33.5	38.8	37.1	20.9	48.5	64.7	22.0	67.8	35.1	35.6	35.1	36.2	35.7	37.0	42.1	42.2	40.0
x	0.665	0.612	0.629	0.791	0.515	0.353	0.780	0.322	0.649	0.644	0.649	0.638	0.643	0.630	0.579	0.578	0.600

**La Palisse, pseudo-colonnade**

- 43 08tb50b-zone2-ox2
- 44 08tb50b-zone2-ox3
- 45 08tb50b-zone2-ox4
- 46 08tb50b-zone2-ox5-micro
- 47 08tb50b-zone2-ox6-micro
- 48 08tb50b-zone2-ox7-micro
- 49 08tb50b-zone2-ox8
- 50 08tb50b-zone2-ox9-exsol

**La Palisse, entablement**

- 52 08tb37-zone2-ox1
- 53 08tb37-zone2-ox2
- 54 08tb37-zone2-ox3
- 55 08tb37-zone2-ox4-micro
- 56 08tb37-zone2-ox5-micro
- 57 08tb37-zone2-ox6-micro

**St Arcons, sommet du prisme**

- 58 sta-2-2A-zone1-ox6-micro
- 59 sta-2-2A-zone1-ox5-micro
- 60 sta-2-2A-zone1-ox4-micro
- 61 sta-2-2A-zone1-ox2
- 62 sta-2-2A-zone1-ox1

Tianomagnétites Fe<sub>3-x</sub>Ti<sub>x</sub>O<sub>4</sub>

N°	61	62	63	64	65	66	67	68	69	71	72	73	74	75	76	77	78
% poids d'oxydes corrigés*																	
SiO2	0.04	0.06	0.03	0.07	0.06	0.10	0.11	0.14	0.21	0.08	0.10	0.06	0.09	0.14	0.04	0.06	0.08
TiO2	20.30	19.60	20.96	20.40	19.76	21.07	20.49	20.27	21.40	21.80	22.45	21.21	22.07	16.24	21.64	21.60	21.20
Al2O3	4.15	4.80	3.91	3.92	4.72	3.73	2.62	2.02	2.11	3.26	2.22	4.00	2.77	3.53	3.71	3.76	3.98
Cr2O3	0.07	0.91	0.04	0.06	0.85	0.02	0.00	0.00	0.07	0.05	0.05	0.41	0.05	0.04	0.10	0.00	0.01
Fe2O3	25.57	25.55	24.12	25.25	26.00	24.80	25.70	25.66	23.81	22.89	22.53	23.46	22.77	32.75	23.67	23.59	23.76
FeO	44.60	43.51	45.38	44.76	43.91	45.88	46.29	46.54	47.08	46.78	48.16	45.44	47.51	42.39	46.34	46.34	45.58
MnO	0.81	0.75	0.85	0.95	0.76	0.89	0.87	1.00	0.96	0.84	0.91	0.84	0.83	0.77	0.82	0.81	0.77
MgO	3.22	3.57	2.81	2.93	3.53	2.86	1.77	0.98	1.75	2.37	1.96	3.18	2.17	1.22	2.96	2.76	2.98
CaO	0.16	0.23	0.10	0.20	0.12	0.23	0.30	0.45	0.40	0.16	0.25	0.18	0.31	0.20	0.15	0.08	0.10
K2O	0.01	0.00	0.02	0.02	0.00	0.04	0.03	0.01	0.01	0.03	0.00	0.01	0.04	0.07	0.02	0.00	0.03
Na2O	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.06	0.00	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01
Total	98.92	98.98	98.22	98.57	99.74	99.63	98.18	97.06	97.80	98.26	98.69	98.78	98.62	97.34	99.46	99.04	98.50
Nombres d'ions sur la base de 4 oxygènes corrigés																	
Si	0.004	0.006	0.003	0.007	0.006	0.009	0.011	0.014	0.020	0.008	0.009	0.006	0.008	0.016	0.004	0.006	0.008
Al	0.019	0.027	0.012	0.023	0.014	0.026	0.036	0.053	0.046	0.019	0.029	0.022	0.035	0.025	0.017	0.009	0.012
Cr	0.006	0.073	0.003	0.005	0.067	0.001	0.000	0.000	0.006	0.004	0.004	0.032	0.004	0.003	0.008	0.000	0.001
Fe3+	0.749	0.750	0.712	0.741	0.758	0.718	0.751	0.755	0.692	0.671	0.651	0.686	0.661	0.983	0.687	0.689	0.698
Ti	1.530	1.485	1.595	1.541	1.479	1.545	1.538	1.545	1.578	1.628	1.624	1.579	1.614	1.329	1.586	1.606	1.599
Mg	0.480	0.536	0.424	0.439	0.524	0.415	0.263	0.148	0.256	0.350	0.281	0.469	0.314	0.198	0.431	0.407	0.445
Fe2+	1.451	1.420	1.488	1.460	1.424	1.476	1.503	1.523	1.522	1.524	1.546	1.477	1.532	1.415	1.494	1.504	1.489
Mn	0.068	0.064	0.073	0.081	0.064	0.074	0.073	0.086	0.080	0.071	0.074	0.070	0.069	0.071	0.068	0.068	0.065
Ca	0.017	0.025	0.011	0.021	0.013	0.024	0.032	0.048	0.042	0.017	0.026	0.020	0.032	0.023	0.015	0.008	0.011
K	0.002	0.000	0.003	0.003	0.000	0.005	0.004	0.001	0.001	0.003	0.000	0.001	0.005	0.009	0.002	0.000	0.004
Na	0.000	0.000	0.000	0.002	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.003	0.011	0.000	0.004	0.001	0.002	0.007	0.001
Somme	4.325	4.385	4.324	4.322	4.354	4.296	4.211	4.175	4.243	4.298	4.256	4.360	4.278	4.072	4.313	4.305	4.333
% moléculaires																	
MT	56.6	56.6	54.7	56.4	57.1	55.3	60.0	61.7	56.4	53.3	52.9	52.3	53.4	72.8	52.9	53.5	53.7
UVS	43.4	43.4	45.3	43.6	42.9	44.7	40.0	38.3	43.6	46.7	47.1	47.7	46.6	27.2	47.1	46.5	46.3
x	0.566	0.566	0.547	0.564	0.571	0.553	0.600	0.617	0.564	0.533	0.529	0.523	0.534	0.728	0.529	0.535	0.537

St Arcons, sommet du prisme			St Arcons, base du prisme			St Arcons, colonnade, centre du prisme			St Arcons, colonnade, bord du prisme		
63 sta-2-2A-zone1-ox3			64 sta-4-6A-ox1			71 sta-F1B-ox2			77 sta-F1A-zone1-ox1		
			65 sta-4-6A-ox3			72 sta-F1B-ox6-micro			78 sta-F1A-zone1-ox2		
			66 sta-4-6A-ox2			73 sta-F1B-ox1					
			67 sta-4-6A-ox4-micro			74 sta-F1B-ox5-micro					
			68 sta-4-6A-ox5-micro			75 sta-F1B-ox4-micro					
			69 sta-4-6A-ox6-micro			76 sta-F1B-ox3					

Tianomagnétites Fe <sub>3-x</sub> Ti <sub>x</sub> O <sub>4</sub>												
N°	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	
% poids d'oxydes corrigés *												
SiO <sub>2</sub>	0.08	0.06	0.08	0.04	0.04	0.04	0.05	0.12	0.09	0.16	1.90	
TiO <sub>2</sub>	21.35	22.26	22.63	22.90	20.61	22.62	22.45	22.25	22.25	22.75	20.35	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.86	2.45	2.85	2.32	6.63	5.30	5.79	4.23	5.66	4.54	1.84	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.14	0.01	0.09	0.13	2.36	0.77	0.64	0.37	0.63	0.58	0.27	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.84	22.56	21.51	22.41	20.96	19.19	20.10	20.82	20.24	19.77	23.36	
FeO	45.92	47.83	47.79	49.00	42.93	45.98	45.43	47.31	45.25	47.13	45.83	
MnO	0.82	0.86	0.82	0.89	0.64	0.71	0.70	0.88	0.72	0.72	0.87	
MgO	2.98	2.00	2.26	1.85	4.68	3.64	4.21	1.88	4.08	2.85	2.02	
CaO	0.15	0.28	0.16	0.16	0.07	0.25	0.12	0.32	0.13	0.32	1.67	
K <sub>2</sub> O	0.00	0.04	0.04	0.02	0.01	0.02	0.00	0.07	0.00	0.04	0.07	
Na <sub>2</sub> O	0.02	0.00	0.04	0.06	0.00	0.04	0.00	0.00	0.08	0.05	0.04	
Total	99.16	98.35	98.25	99.77	98.94	98.57	99.48	98.26	99.13	98.92	98.20	
Nombres d'ions sur la base de 4 oxygènes corrigés												
Si	0.008	0.005	0.008	0.004	0.004	0.004	0.005	0.012	0.009	0.016	0.170	
Al	0.018	0.032	0.018	0.018	0.008	0.029	0.014	0.038	0.016	0.037	0.176	
Cr	0.011	0.001	0.007	0.010	0.190	0.060	0.050	0.029	0.049	0.045	0.019	
Fe <sup>3+</sup>	0.695	0.655	0.628	0.643	0.624	0.567	0.590	0.616	0.596	0.579	0.651	
Ti	1.579	1.630	1.667	1.630	1.576	1.692	1.665	1.681	1.660	1.675	1.371	
Mg	0.438	0.291	0.329	0.261	0.710	0.540	0.619	0.282	0.604	0.416	0.269	
Fe <sup>2+</sup>	1.486	1.545	1.550	1.561	1.420	1.509	1.483	1.556	1.481	1.533	1.420	
Mn	0.068	0.071	0.068	0.071	0.055	0.060	0.058	0.075	0.060	0.060	0.066	
Ca	0.016	0.029	0.016	0.017	0.007	0.026	0.013	0.035	0.014	0.033	0.160	
K	0.000	0.005	0.005	0.003	0.002	0.003	0.000	0.009	0.000	0.006	0.008	
Na	0.004	0.000	0.008	0.011	0.000	0.008	0.000	0.000	0.015	0.010	0.006	
Somme	4.322	4.264	4.304	4.228	4.595	4.498	4.497	4.334	4.505	4.410	4.317	
% moléculaires												
MT	53.5	53.3	50.6	52.7	43.2	41.3	41.0	50.8	42.0	45.6	56.5	
UVS	46.5	46.7	49.4	47.3	56.8	58.7	59.0	49.2	58.0	54.4	43.5	
x	0.535	0.533	0.506	0.527	0.432	0.413	0.410	0.508	0.420	0.456	0.565	

St Arcons, colonnade, bord du prisme	St Arcons, colonnade, prisme zoné
82 sta-F1A-zone1-ox6-micro	83 stab1-zone1-ox1
	84 stab1-zone1-ox2-micro
	85 stab1-zone2-ox1
	86 stab1-zone2-ox2
	87 stab1-zone3-ox1
	88 stab1-zone3-ox2
	79 sta-F1A-zone1-ox3
	80 sta-F1A-zone1-ox4-micro
	81 sta-F1A-zone1-ox5-micro



### Calcul de la formule structurale des titanomagnétites.

- (1) Pourcentage d'oxyde brut (% Ox<sub>(1)</sub>) = (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO (Fer total), SiO<sub>2</sub>, MnO, TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O et MgO)
- (2) Pourcentage molaire (% Mol<sub>(2)</sub>) = % Ox<sub>(1)</sub> / Poids molécules

Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 151.989	K <sub>2</sub> O = 94.203
FeO = 71.849	CaO = 56.079
SiO <sub>2</sub> = 60.084	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 101.96
MnO = 70.937	Na <sub>2</sub> O = 61.978
TiO <sub>2</sub> = 79,898	MgO = 40.311

- (3) Pourcentage atomique (% At<sub>(3)</sub>) :

Cr = % Mol <sub>(2)</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *2	K = % Mol <sub>(2)</sub> K <sub>2</sub> O*2
Fe <sup>2+</sup> = % Mol <sub>(2)</sub> FeO	Ca = % Mol <sub>(2)</sub> CaO
Si = % Mol <sub>(2)</sub> SiO <sub>2</sub>	Al = % Mol <sub>(2)</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *2
Mn = % Mol <sub>(2)</sub> MnO	Na = % Mol <sub>(2)</sub> Na <sub>2</sub> O*2
Ti = % Mol <sub>(2)</sub> TiO <sub>2</sub>	Mg = % Mol <sub>(2)</sub> MgO

- (4) Nombre d'oxygène :

Cr = % Mol <sub>(2)</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *3	K = % Mol <sub>(2)</sub> K <sub>2</sub> O
Fe <sup>2+</sup> = % Mol <sub>(2)</sub> FeO	Ca = % Mol <sub>(2)</sub> CaO
Si = % Mol <sub>(2)</sub> SiO <sub>2</sub> *2	Al = % Mol <sub>(2)</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *3
Mn = % Mol <sub>(2)</sub> MnO	Na = % Mol <sub>(2)</sub> Na <sub>2</sub> O
Ti = % Mol <sub>(2)</sub> TiO <sub>2</sub> *2	Mg = % Mol <sub>(2)</sub> MgO
Somme = $\sum$ (Cr, Fe <sup>2+</sup> , Si, Mn, Ti, K, Ca, Al, Na, Mg)	
Coefficient = 4/Somme	

- (5) Formule structurale brute sur la base de 4 oxygènes :

Cr = % At <sub>(3)</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *coef <sub>(4)</sub>	K = % At <sub>(3)</sub> K <sub>2</sub> O*coef <sub>(4)</sub>
Fe <sup>2+</sup> = % At <sub>(3)</sub> FeO*coef <sub>(4)</sub>	Ca = % At <sub>(3)</sub> CaO*coef <sub>(4)</sub>
Si = % At <sub>(3)</sub> SiO <sub>2</sub> *coef <sub>(4)</sub>	Al = % At <sub>(3)</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *coef <sub>(4)</sub>
Mn = % At <sub>(3)</sub> MnO*coef <sub>(4)</sub>	Na = % At <sub>(3)</sub> Na <sub>2</sub> O*coef <sub>(4)</sub>
Ti = % At <sub>(3)</sub> TiO <sub>2</sub> *coef <sub>(4)</sub>	Mg = % At <sub>(3)</sub> MgO*coef <sub>(4)</sub>
Somme = $\sum$ (Cr, Fe <sup>2+</sup> , Si, Mn, Ti, K, Ca, Al, Na, Mg)	

- (6) Calculs des pôles :

- Magnesioferrite MgFe<sup>3+</sup><sub>2</sub>O<sub>4</sub> = Mg (5)/2 ; Fe<sup>3+</sup> = Magnesio \*2

- Ulvospinel  $\text{Fe}^{2+}_2\text{TiO}_4 = \text{Ti} (5) ; \text{Fe}^{2+} = \text{Ulvosp} *2$
- Jacosite  $\text{MnFe}^{3+}_2\text{O}_4 = \text{Mn}(5) ; \text{Fe}^{3+} = \text{Jacosite} *2$
- Chromite  $\text{Fe}^{2+}\text{Cr}_2\text{O}_4 = \text{Cr}(5)/2 ; \text{Fe}^{2+} = \text{Chromite} *2$
- Hercynite  $\text{Fe}^{2+}\text{Al}_2\text{O}_4 = \text{Al}(5)/2 ; \text{Fe}^{2+} = \text{Hercynite} *2$
- Fe restant =  $\text{Fe} (5) + \sum(\text{Fe}^{2+}_{(6)}, \text{Fe}^{3+}_{(6)})$
- $1/3 \text{Fe}^{2+} = 1/3 * \text{Fe restant}$
- $2/3 \text{Fe}^{3+} = 2/3 * \text{Fe restant}$
- Magnétite = Fe restant
- Somme =  $\sum(\text{Magnesio}, \text{Ulvosp}, \text{Jacosite}, \text{Chromite}, \text{Hercynite}, \text{Magnetite})$
- Coefficient =  $100/\text{Somme}$

(7) Calculs des pôles purs :

- Magnesioferrite =  $\text{Magnesio} (6) * \text{coef}_{(6)}$
- Ulvospinel =  $\text{Ulvosp} (6) * \text{coef}_{(6)}$
- Jacosite =  $\text{Jacosite} (6) * \text{coef}_{(6)}$
- Chromite =  $\text{Chromite} (6) * \text{coef}_{(6)}$
- Hercynite =  $\text{Hercynite} (6) * \text{coef}_{(6)}$
- Magnetite =  $\text{magnetite} (6) * \text{coef}_{(6)}$

(8) Proportion d'ulvöspinelle :

- $\text{MT} = 100 * \text{Magnetite}_{(7)} / (\text{Magnetite}_{(7)} + \text{Ulvospinel}_{(7)})$
- $\text{USV} = 100 * \text{Ulvospinel}_{(7)} / (\text{Magnetite}_{(7)} + \text{Ulvospinel}_{(7)})$
- $\text{X} = \text{MT}/100$
- $\text{Fe}^{3+} = \sum(\text{Fe}^{3+}\text{Magnesio}_{(6)}, \text{Fe}^{3+}\text{Jacosite}_{(6)}, \text{Fe}^{3+}2/3_{(6)})$
- $\text{Fe}^{2+} = \sum(\text{Fe}^{2+}\text{Ulvosp}_{(6)}, \text{Fe}^{2+}\text{Chromite}_{(6)}, \text{Fe}^{2+}1/3_{(6)})$
- $\text{Fe}^{2+\%} = 100 * \text{Fe}^{2+}_{(8)} / (\text{Fe}^{3+}_{(8)} + \text{Fe}^{2+}_{(8)})$
- $\text{Fe}^{3+\%} = 100 * \text{Fe}^{3+}_{(8)} / (\text{Fe}^{3+}_{(8)} + \text{Fe}^{2+}_{(8)})$

(9) Pourcentages d'oxydes corrigés (% Ox corr) :

$\text{Cr}_2\text{O}_3 = \text{Cr}_2\text{O}_3_{(1)}$	$\text{K}_2\text{O} = \text{K}_2\text{O}_{(1)}$
$\text{FeO} = \text{FeO}_{(1)} * \text{Fe}^{2+\%}/100$	$\text{CaO} = \text{CaO}_{(1)}$
$\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{FeO}_{(1)} * \text{Fe}^{3+\%}/100$	$\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{Al}_2\text{O}_3_{(1)}$
$\text{SiO}_2 = \text{SiO}_2_{(1)}$	$\text{Na}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{O}_{(1)}$
$\text{MnO} = \text{MnO}_{(1)}$	$\text{MgO} = \text{MgO}_{(1)}$
$\text{TiO}_2 = \text{TiO}_2_{(1)}$	

- $\text{Mol FeO} = \text{FeO}_{(9)}/71.846$

- Mol  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{Fe}_2\text{O}_3 / 159.6922$
- At  $\text{Fe}^{2+} = \text{mol FeO} \cdot 2$
- At  $\text{Fe}^{3+} = \text{mol Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2$
- Oxygènes =  $\sum((\text{Cr, Si, Mn, Ti, K, Ca, Al, Na, Mg})_{(4)} + \text{mol FeO}_{(9)} + \text{mol Fe}_2\text{O}_3_{(9)} \cdot 3)$
- Coefficient =  $4 / \sum \text{Ox}_{(9)}$

(10) Formule structurale corrigée:

$\text{Cr} = \text{Cr}_{(5)} \cdot \text{coef}_{(9)}$	$\text{K} = \text{K}_{(5)} \cdot \text{coef}_{(9)}$
$\text{Fe}^{2+} = \% \text{ At Fe}^{2+}_{(9)} \cdot \text{coef}_{(9)}$	$\text{Ca} = \text{Ca}_{(5)} \cdot \text{coef}_{(9)}$
$\text{Fe}^{3+} = \% \text{ At Fe}^{3+}_{(9)} \cdot \text{coef}_{(9)}$	$\text{Al} = \text{Al}_{(5)} \cdot \text{coef}_{(9)}$
$\text{Si} = \text{Si}_{(5)} \cdot \text{coef}_{(9)}$	$\text{Na} = \text{Na}_{(5)} \cdot \text{coef}_{(9)}$
$\text{Mn} = \text{Mn}_{(5)} \cdot \text{coef}_{(9)}$	$\text{Mg} = \text{Mg}_{(5)} \cdot \text{coef}_{(9)}$
$\text{Ti} = \text{Ti}_{(5)} \cdot \text{coef}_{(9)}$	
$\text{Somme} = \sum (\text{Cr, Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Si, Mn, Ti, K, Ca, Al, Na, Mg})$	



## Annexe IV : Données magnétiques

- Données d'anisotropie de susceptibilité magnétique :

#### La coulée de La Palisse

				Site1		
Colonnade N=68	Km (.10-2) SI	P'	T	K1 (dec/ inc)	K2 (dec/ inc)	K3 (dec/ inc)
Moyenne	5.31	1.037	0.089	92/11	190/ 33	346/ 55
Max	5.79	1.08	0.69			
Min	4.94	1.01	-0.93			
Echantillons						
07TB02B	5.66	1.038	0.693	275.5/ 3.6	183.3/ 31.4	11.4/ 58.4
07TB03B	5.52	1.044	0.283	258.2/ 7.9	163.5/ 30.1	1.4/ 58.7
07TB04C	5.55	1.052	0.333	268.9/ 3.1	177.4/ 24.9	5.6/ 64.9
07TB05B	5.51	1.057	0.376	268.2/ 1.7	177.5/ 20.8	2.6/ 69.2
07TB06B	5.52	1.056	0.337	101.6/ 0.1	191.6/ 19.1	11.3/ 70.9
07TB07C	5.55	1.049	0.267	105.1/ 3.8	196.5/ 20.6	5.1/ 69
07TB11D	5.71	1.041	0.397	278/ 6.9	184.7/ 25.9	21.8/ 63.1
08TB12C	5.27	1.028	0.224	83.6/ 26.7	180.1/ 12.8	293.2/ 60
08TB12F	5.32	1.05	-0.316	87.6/ 41.8	203.4/ 25.9	315/ 37.1
08TB13B	5.12	1.049	-0.604	95.6/ 33.2	283.6/ 56.6	188/ 3.7
08TB14B	5.25	1.01	0.675	190/ 21.7	86.6/ 30.3	309.8/ 51.3
08TB14C	5.79	1.014	-0.421	194/ 19.8	62/ 61.7	291.3/ 19.3
08TB15B	5.45	1.032	-0.416	71/ 25.9	164.1/ 6.4	266.9/ 63.2
08TB15C	5.74	1.034	-0.611	72.2/ 27.1	191/ 43.2	321.5/ 34.6
08TB16B	5.18	1.039	-0.519	92.7/ 33	215.8/ 40.1	338.3/ 32.6
08TB16C	5.04	1.035	-0.57	97.1/ 34.1	212.7/ 32.6	333.8/ 39
08TB17D	5.32	1.016	0.635	100.5/ 27.1	214.6/ 38.6	345.6/ 39.5
08TB17E	5.07	1.01	-0.136	195.2/ 43.7	292.2/ 7.3	29.6/ 45.4
08TB18B	5.10	1.058	-0.304	82.4/ 31	184.9/ 19.8	302.3/ 51.9
08TB18C	5.10	1.04	0.125	107.6/ 27.9	206.9/ 17	324.3/ 56.5
08TB20B	4.94	1.017	0.59	178.6/ 54.7	292.2/ 15.8	31.8/ 30.6
08TB21B	5.22	1.019	0.542	279/ 5.4	181.5/ 53.9	12.9/ 35.6
08TB21C	5.03	1.013	0.404	162.8/ 49	275.8/ 18.7	19.5/ 34.9
08TB22B	5.24	1.018	-0.931	275.1/ 10.7	180.2/ 24.7	26.7/ 62.8
08TB22C	5.34	1.024	-0.348	270.6/ 0.4	179.8/ 62.3	0.9/ 27.6
08TB23B	5.11	1.024	-0.185	50.6/ 14.5	217.1/ 75.1	319.8/ 3.3
08TB23C	5.05	1.021	-0.254	74.5/ 20	202.8/ 59.6	336.1/ 21.9
08TB24C	5.47	1.04	-0.727	75.3/ 17.2	210.2/ 66.4	340.3/ 15.8
08TB24D	5.52	1.032	-0.529	77.2/ 22	181.8/ 32	318.9/ 49.6
08TB25B	5.54	1.024	0.085	71.3/ 13.5	340.8/ 2	242.4/ 76.3
08TB25C	5.56	1.03	-0.034	86.1/ 4.1	177.6/ 20.6	345.2/ 69
08TB26B	5.42	1.028	0.057	65/ 40.7	173.5/ 20.3	283.2/ 42.4
08TB26C	5.50	1.031	-0.444	96.6/ 31.3	346.6/ 29.4	223.1/ 44.4
08TB27	5.12	1.079	-0.102	161.5/ 36.7	56.2/ 19.5	304.1/ 46.8
08TB40B	5.00	1.057	0.147	89.1/ 31.6	189.5/ 16.4	302.8/ 53.5
08TB41B	5.49	1.059	-0.339	87.9/ 21.2	187/ 22.2	318.8/ 58.5
08TB41C	5.33	1.04	-0.459	97.8/ 25.9	200.8/ 24.9	328.3/ 52.7
08TB42B	5.37	1.043	0.041	84.5/ 28.8	190.4/ 26.4	315.2/ 49
08TB43B	5.43	1.038	-0.239	75.8/ 9.3	177.2/ 50.6	338.5/ 37.9
08TB43C	5.52	1.036	0.536	255.3/ 1.2	164.4/ 40	346.7/ 49.9
08TB44B	5.56	1.05	0.433	54.7/ 43.9	293.2/ 28.5	182.9/ 32.7
08TB44C	5.71	1.046	0.367	48.9/ 55.3	289.6/ 18.7	189.2/ 28.1

## La coulée de La Palisse

Site1						
Colonnade	Km (.10-2) SI	P'	T	K1 (dec/ inc)	K2 (dec/ inc)	K3 (dec/ inc)
08TB45B	5.61	1.026	0.843	238.4/ 12.5	144.1/ 18.6	0.5/ 67.3
08TB45C	5.64	1.043	0.618	281.6/ 5.5	188.2/ 32	20.3/ 57.4
08TB46B	5.30	1.032	0.332	95.5/ 19.6	215.3/ 54.4	354.4/ 28.4
08TB47B	4.87	1.072	0.074	156/ 24.6	259.2/ 26.5	29.6/ 52.4
08TB47C	5.09	1.079	0.069	157.5/ 28.8	260.8/ 22.7	23/ 51.9
08TB48B	5.27	1.051	0.634	119.7/ 5	212.8/ 30.9	21.4/ 58.6
08TB49B	4.88	1.041	0.671	159.9/ 31.6	265.5/ 23.7	25.5/ 48.7
08TB49C	4.91	1.052	0.516	148.1/ 21.8	248.4/ 24	20.8/ 56.6
08TB80A	5.27	1.033	0.148	102.5/ 43	256.3/ 43.9	359.6/ 13.4
08TB80B	5.34	1.035	0.297	260/ 7.1	161.7/ 49.1	356/ 40.1
08TB80C	5.21	1.049	0.202	263.3/ 7	170.1/ 24.5	8/ 64.4
08TB81A	5.18	1.037	0.388	254.9/ 5.9	144.4/ 73.5	346.5/ 15.4
08TB81B	5.34	1.034	0.21	248.2/ 26.5	141.6/ 29.8	12/ 48
08TB82A	5.17	1.033	0.723	277.4/ 23.8	137.4/ 60.1	15.2/ 17.1
08TB82B	5.41	1.022	-0.079	258.6/ 22.5	146.2/ 42.7	8.1/ 38.8
08TB83A	5.11	1.031	0.069	264.7/ 14.4	156.2/ 51	5.2/ 35.3
08TB83B	5.36	1.034	0.682	240.5/ 14.1	144.7/ 21.9	0.8/ 63.5
08TB84A	5.19	1.024	0.068	106.4/ 5.8	205.9/ 58.4	12.9/ 30.9
08TB84B	5.31	1.026	0.711	271.3/ 19.2	176.8/ 12.6	55.5/ 66.8
08TB85A	5.16	1.043	0.063	103.2/ 19.5	204.6/ 29.2	344.3/ 53.8
08TB86A	5.14	1.047	-0.368	61.3/ 0.9	151.8/ 33.3	329.9/ 56.7
08TB86B	5.10	1.031	-0.266	244/ 13.9	152/ 8.1	32.4/ 73.8
08TB87A	5.14	1.047	-0.241	241.1/ 1.7	151.1/ 0	59.4/ 88.3
08TB88A	5.15	1.044	-0.151	251.5/ 7	158.2/ 25.1	355.9/ 63.9
08TB88B	5.26	1.03	0.408	264.3/ 6.4	172.1/ 18.8	12.3/ 70.1
08TB88C	5.19	1.025	0.349	123.1/ 11.5	217.1/ 18.8	3.3/ 67.7
Entablature N=16						
Moyenne	4.65	1.079	0.02	204/ 5	105/ 60	297/ 29
Max	5.32	1.11	0.43			
Min	4.13	1.03	-0.31			
Echantillon						
08TB28B	5.26	1.071	-0.314	190.3/ 30	78/ 33.3	311.7/ 42.1
08TB28C	5.32	1.074	-0.171	196/ 26.3	87.8/ 32.3	316.8/ 46
08TB29B	4.77	1.073	0.103	200.5/ 20.8	91.7/ 40.3	310.8/ 42.5
08TB30B	4.61	1.092	0.06	28/ 5.2	124.6/ 51.8	293.9/ 37.7
08TB31B	4.58	1.087	0.014	184.8/ 21.2	79.1/ 35	299.7/ 47.4
08TB32B	4.63	1.077	-0.032	201.2/ 22	91.2/ 40.2	312.3/ 41.8
08TB32D	4.59	1.078	0.09	190/ 19.1	86.2/ 34.7	303.4/ 49
08TB33B	4.26	1.082	0.061	185.3/ 10.7	86.3/ 39.4	287.6/ 48.6
08TB33C	4.13	1.083	0.089	174.4/ 8.9	78.2/ 34.6	276.8/ 53.9
08TB34B	5.11	1.029	0.428	184.9/ 30.3	71.6/ 34.1	305.5/ 41.1
08TB34C	5.14	1.029	0.217	194.3/ 25.5	80.2/ 40.6	306.7/ 38.8
08TB37C	4.40	1.098	0.102	38.1/ 14.6	248.6/ 73.2	130.2/ 8.2
08TB38B	4.32	1.107	0.052	26.7/ 14.5	260.6/ 66.3	121.6/ 18.3
08TB38C	4.45	1.1	-0.184	29.4/ 13.1	259.4/ 70.1	122.9/ 14.7
08TB39B	4.49	1.093	-0.054	27.7/ 13	265.8/ 66.4	122.4/ 19.3
08TB39C	4.39	1.087	-0.143	26.8/ 8.9	254.6/ 76.8	118.3/ 9.6



# La coulée de La Palisse

Site 2						
	Km (.10-2) SI	P'	T	K1 (dec/ inc)	K2 (dec/ inc)	K3 (dec/ inc)
Colonnade N=28						
Moyenne	5.52	1.039	0.026	359/ 70	236/ 11	143/ 16
Max	5.79	1.06	0.63			
Min	5.07	1.02	-0.48			
Echantillons						
08TB89A	5.07	1.036	0.462	227.7/ 48	23.2/ 39.3	123.6/ 12.4
08TB89B	5.26	1.046	0.374	229.9/ 59.3	36.6/ 30.1	130/ 5.8
08TB90A	5.17	1.044	0.318	209.9/ 50.4	11.8/ 38.2	108.9/ 8.9
08TB91A	5.47	1.046	0.632	31.3/ 51	228.4/ 37.8	131.8/ 8.4
08TB91B	5.65	1.042	0.601	300.8/ 78.1	42.5/ 2.4	133/ 11.6
08TB92A	5.61	1.03	0.202	32.8/ 74.2	230.1/ 15.2	138.9/ 4.5
08TB92B	5.74	1.039	0.165	340.9/ 79.4	221.8/ 5.2	131/ 9.2
08TB92C	5.63	1.039	0.185	321.1/ 77.5	218/ 2.8	127.4/ 12.1
08TB93A	5.46	1.03	0.014	47.5/ 57.5	212.2/ 31.6	306.5/ 6.9
08TB93B	5.49	1.035	0.291	36.1/ 46.7	207.8/ 43	301.7/ 4.2
08TB94A	5.38	1.022	-0.036	31.7/ 66.3	214.6/ 23.6	124.1/ 1.1
08TB94B	5.23	1.025	0.174	22.6/ 62.6	219.6/ 26.3	126.2/ 6.9
08TB94C	5.24	1.023	0.245	16.4/ 71.1	216.3/ 17.8	124.4/ 6
08TB95A	5.54	1.045	-0.09	3.6/ 64.1	263.5/ 4.9	171.2/ 25.4
08TB95B	5.52	1.042	-0.065	18.8/ 62	264.9/ 12.2	169.1/ 24.8
08TB95C	5.55	1.04	0.055	7.8/ 67.2	266.9/ 4.6	175/ 22.2
08TB96A	5.68	1.046	-0.101	308.3/ 60.3	55.6/ 9.7	150.8/ 27.8
08TB96B	5.69	1.059	-0.05	327.5/ 64	64.7/ 3.5	156.4/ 25.8
08TB96C	5.75	1.058	-0.225	323.2/ 60.1	62.4/ 5.2	155.4/ 29.4
08TB97A	5.58	1.03	-0.14	344.9/ 63.3	78.9/ 2	170/ 26.6
08TB97B	5.79	1.034	-0.186	4.9/ 63.8	251.8/ 10.9	156.9/ 23.5
08TB97C	5.60	1.032	-0.04	349.9/ 63.3	249.2/ 5.4	156.5/ 26
08TB98A	5.62	1.031	-0.219	323.8/ 64.6	230.4/ 1.6	139.6/ 25.3
08TB98B	5.69	1.036	-0.338	327.9/ 59.4	58/ 0	148/ 30.6
08TB98C	5.62	1.041	-0.369	336.7/ 56.5	246/ 0.4	155.8/ 33.5
08TB99	5.54	1.045	-0.483	114.3/ 22.2	212.9/ 20.2	341/ 59.3
08TB99B	5.24	1.044	-0.237	124.8/ 25.6	221.6/ 14	337.5/ 60.3
08TB99C	5.67	1.046	-0.399	125.4/ 21	218.4/ 7.9	327.8/ 67.4
Zone à débit planaire (zdp) N=32						
Moyenne	5.51	1.048	0.227	25/ 86	232/ 2	142/ 1
Max	6.07	1.08	0.97	0.00		
Min	5.45	1.03	-0.24	0.00		
Echantillons	Km (.10-2) SI	Pj	Tj			
08TB59B	5.63	1.026	0.004	157.6/ 71.7	49.6/ 5.8	317.8/ 17.2
08TB59C	5.73	1.032	-0.235	183.5/ 73.9	62.9/ 8.4	330.9/ 13.7
08TB60B	5.80	1.067	0.739	82.1/ 66.2	222.9/ 18.9	317.8/ 14
08TB60C	5.91	1.061	0.921	221.5/ 30.9	62.2/ 57.4	317.2/ 9.4
08TB61B	5.75	1.037	0.454	145.7/ 86.1	49.8/ 0.4	319.8/ 3.9
08TB61C	6.07	1.044	0.758	137/ 81.2	235.4/ 1.3	325.6/ 8.7
08TB62B	5.75	1.076	0.535	76.8/ 55.7	249.9/ 34.1	342/ 3.2
08TB63B	5.45	1.039	0.97	234/ 29.7	69.3/ 59.4	327.8/ 6.7

## La coulée de La Palisse

Site 2						
Zdp	Km (.10-2) SI	P'	T	K1 (dec/ inc)	K2 (dec/ inc)	K3 (dec/ inc)
08TB63C	5.52	1.04	0.744	230/ 46.8	59.5/ 42.8	325.1/ 4.7
08TB64B	5.42	1.041	0.865	218/ 26.3	46.8/ 63.4	309.8/ 3.5
08TB64C	5.54	1.036	0.835	223.7/ 17.3	38.9/ 72.7	133.3/ 1.4
08TB65B	5.63	1.035	0.502	218/ 29.6	33.6/ 60.4	126.9/ 1.9
08TB65C	5.53	1.034	0.562	216.3/ 23.7	39/ 66.3	306.8/ 1
08TB66B	5.66	1.028	0.338	277.7/ 73.6	152.8/ 9.5	60.6/ 13.2
08TB66C	5.64	1.027	0.246	313.6/ 71.6	152.6/ 17.5	60.8/ 5.6
08TB67B	5.38	1.007	-0.055	212.7/ 39.3	11/ 48.6	113.6/ 10.9
08TB67C	5.48	1.005	0.156	297.7/ 67.6	33.3/ 2.3	124.3/ 22.3
08TB68B	5.26	1.01	0.1	37/ 31.1	223.4/ 58.7	128.7/ 2.8
08TB68C	5.37	1.012	0.214	48.5/ 35.3	233.8/ 54.6	140.3/ 2.5
08TB69B	5.41	1.018	0.7	244.7/ 73.9	44.6/ 15.2	136.1/ 5.3
08TB69C	5.31	1.015	0.703	232.6/ 69.5	44.7/ 20.3	135.6/ 2.6
08TB100	5.74	1.04	0.023	358.9/ 75	255.6/ 3.5	164.7/ 14.5
08TB100B	5.65	1.034	-0.129	358.3/ 70.1	259.7/ 3.1	168.6/ 19.6
08TB100C	5.60	1.034	-0.043	349.9/ 68.7	254.7/ 2	163.9/ 21.2
08TB101A	5.33	1.032	-0.041	277.5/ 73.5	88.2/ 16.3	179/ 2.5
08TB101B	5.37	1.029	-0.528	315.3/ 83	85.5/ 4.5	175.9/ 5.3
08TB102A	5.10	1.018	-0.588	308.9/ 74.4	184.4/ 9	92.3/ 12.7
08TB102B	5.04	1.023	-0.525	330.5/ 62.4	226.1/ 7.4	132.4/ 26.5
08TB103A	5.38	1.014	-0.491	0.9/ 66.6	115.7/ 10.3	209.7/ 20.8
08TB103B	5.27	1.013	-0.369	16.6/ 69	111.3/ 1.8	202/ 20.9
08TB103C	5.33	1.014	-0.515	1.6/ 69.8	91.9/ 0.1	181.9/ 20.2
08TB104A	5.39	1.015	0.404	356.1/ 46.3	255.9/ 9.7	157/ 42.1
Pseudo-colonnade N=9						
Moyene	4.72	1.027	0.506	225/24	127/18	3/60
Max	4.99	1.03	0.70			
Min	4.34	1.02	0.23			
Echantillons						
70b	4.853	1.028	0.699			
70c	4.937	1.025	0.496			
71b	4.598	1.030	0.684			
71c	4.855	1.030	0.611			
72b	4.831	1.030	0.584			
73b	4.994	1.025	0.390			
74b	4.359	1.023	0.225			
74d	4.338	1.027	0.355			

**Colonnade de Saint-Arcons-d'Allier**

Colonnade N= 70

Km.10-3 SI

P'

T

**Colonnade de Saint-Arcons-d'Allier**

Km.10-3 SI

P'

T

Moyenne		3.08	1.02	0.12	Echantillons				
Max		3.77	1.05	0.90	N°	Nom			
Min		2.60	1.01	-0.62	6	STA-4-1D	2.95	1.029	-0.209
Echantillons					6	STA-4-1C	2.89	1.026	-0.308
N°	Nom				6	STA-4-1B	2.92	1.022	-0.264
19	STA-6-1A	2.71	1.029	0.043	6	STA-4-1A	3.04	1.021	-0.02
18	STA-6-2A	2.60	1.027	0.067	5	STA-4-2D	2.93	1.03	0.27
17	STA-1-1C	3.69	1.012	0.136	5	STA-4-2C	3.02	1.029	0.323
17	STA-1-1B	3.77	1.013	0.175	5	STA-4-2B	3.07	1.028	0.433
17	STA-1-1A	3.72	1.018	0.494	5	STA-4-2A	3.14	1.032	0.865
16	STA-1-2D	2.84	1.017	0.31	4	STA-4-3E	2.94	1.027	0.042
16	STA-1-2C	3.00	1.049	0.549	4	STA-4-3D	2.96	1.024	0.094
16	STA-1-2B	2.88	1.017	-0.016	4	STA-4-3C	2.89	1.021	0.04
16	STA-1-2A	2.89	1.02	0.728	4	STA-4-3B	2.88	1.02	-0.092
15	STA-1-3C	3.04	1.014	0.214	4	STA-4-3A	2.97	1.021	-0.1
15	STA-1-3B	3.17	1.014	0.541	3	STA-4-4E	2.80	1.027	0.131
15	STA-1-3A	3.19	1.014	0.585	3	STA-4-4D	2.86	1.022	0.365
14	STA-2-1C	3.05	1.011	0.156	3	STA-4-4C	2.85	1.027	0.514
14	STA-2-1B	3.09	1.009	-0.09	3	STA-4-4B	2.96	1.023	0.493
14	STA-2-1A	3.12	1.016	0.897	3	STA-4-4A	3.09	1.023	0.222
13	STA-2-2D	3.08	1.013	-0.387	2	STA-4-5D	2.58	1.027	0.162
13	STA-2-2C	3.14	1.013	0.134	2	STA-4-5C	2.73	1.025	0.377
13	STA-2-2B	3.14	1.015	-0.184	2	STA-4-5B	2.84	1.026	0.482
13	STA-2-2A	3.12	1.008	0.4	2	STA-4-5A	2.75	1.026	0.557
12	STA-2-3D	3.08	1.013	0.164	1	STA-4-6E	2.89	1.028	0.424
12	STA-2-3C	3.05	1.011	0.227	1	STA-4-6D	2.87	1.023	0.29
12	STA-2-3B	3.05	1.01	-0.136	1	STA-4-6C	2.88	1.029	0.74
12	STA-2-3A	3.10	1.013	0.571	1	STA-4-6B	2.94	1.027	0.572
11	STA-3-1D	2.94	1.013	0.474	1	STA-4-6A	2.89	1.029	0.809
11	STA-3-1C	2.94	1.014	0.523					
11	STA-3-1B	3.03	1.014	0.508					
11	STA-3-1A	3.10	1.034	-0.302					
10	STA-3-2D	3.41	1.016	-0.191					
10	STA-3-2C	3.36	1.019	-0.186					
10	STA-3-2B	3.46	1.013	0.054					
10	STA-3-2A	3.37	1.012	0.153					
9	STA-3-3D	3.02	1.019	-0.383					
9	STA-3-3C	2.97	1.019	-0.615					
9	STA-3-3B	3.17	1.012	-0.354					
9	STA-3-3A	3.07	1.017	-0.055					
8	STA-3-4D	3.41	1.028	-0.023					
8	STA-3-4C	3.43	1.02	-0.119					
8	STA-3-4B	3.46	1.02	0.048					
8	STA-3-4A	3.38	1.026	0.269					
7	STA-3-5D	3.41	1.028	-0.111					
7	STA-3-5C	3.37	1.021	-0.246					
7	STA-3-5B	3.44	1.019	-0.171					
7	STA-3-5A	3.53	1.031	0.32					

**Prisme de La Palisse**

Echantillon	Km.10-3 SI	P'	T	K1dec	K1inc	K2dec	K2inc	K3dec	K3inc
LP4	3.276662	1.042	0.498	202.9	15.2	104.4	28.5	317.6	57
LP5	3.650737	1.046	0.11	199.7	14.9	100.2	31.8	311.3	54.1
LP6	2.978599	1.038	0.148	203.4	13.3	102.5	38.8	308.7	48.2
LP7	3.655862	1.036	0.375	200.1	15.6	96.6	39.8	306.9	46
LP8	3.470912	1.034	0.371	193.6	11.5	94.1	39.1	297	48.6
LP9	3.598165	1.032	0.384	194.9	4.3	101.3	40.3	289.8	49.4
LP10	3.753109	1.033	0.498	189.3	3.5	96.1	41.9	283.2	47.9
LP11	3.780175	1.035	0.701	191.7	7.9	95.8	36.4	292.1	52.5
LP12	3.659427	1.04	0.802	79.7	31.4	181.8	18.9	298	52.2
LP13	3.006204	1.047	0.471	104.8	44.5	204.9	10.1	304.7	43.8
LP14	3.67607	1.046	0.275	122.9	38.5	215.3	3	309	51.3
LP15	3.581709	1.04	0.4	122.7	34.5	31.5	1.6	299.2	55.5
LP16	3.769763	1.035	0.537	97.1	33.9	191.9	7.2	292.4	55.1
LP17	3.630693	1.032	0.605	79.4	26.1	178.3	17.7	298.6	57.7
LP18	3.465113	1.031	0.565	57.9	15.7	156.7	28.7	302.7	56.6
LP19	3.583292	1.035	0.546	43.7	6.5	138.1	33.8	304.2	55.4
LP20	3.626383	1.037	0.341	220.3	0.9	129.6	34.9	311.5	55.1
LP21	3.601079	1.039	0.261	208.3	7.8	113.2	32.6	310.1	56.2
LP22	3.754823	1.042	0.101	202.2	16.6	102.4	29.8	317.5	55
LP23	3.449089	1.044	0.34	214.3	10	116.2	38.3	316.4	49.9
LP24	3.221035	1.043	0.382	49.4	0.8	140.1	41.7	318.4	48.3
LP25	3.77483	1.034	0.269	207.9	13.2	108.2	35.5	314.9	51.4
LP26	3.489904	1.036	0.155	202.7	11.8	106.4	27.5	313.6	59.7
LP27	3.613502	1.04	0.257	210.1	5.6	117.3	26.7	311	62.6
LP28	3.630221	1.04	0.307	216.3	3.4	124.6	27.2	312.8	62.6
LP29	3.257999	1.04	0.397	43.6	7.4	137.2	25.7	298.8	63.1
LP30	3.563861	1.037	0.58	60.9	19.8	156.6	15.5	281.9	64.5
LP31	3.719659	1.036	0.616	76.2	25	171.7	11.5	284.4	62.1
LP32	3.544389	1.039	0.659	101	33.4	10.7	0.4	280.2	56.6
LP33	3.657606	1.04	0.55	103.9	34.8	194.7	1.2	286.5	55.2
LP34	3.394776	1.038	0.375	110.3	37.4	205	6.1	302.8	52
LP35	3.28622	1.034	0.266	85	29	187.9	22	309.2	52.2
LP36	3.434324	1.042	0.571	88	33.4	184.7	10.2	289.4	54.7
LP37	3.699198	1.041	0.676	89.8	31.7	183.7	6.3	283.7	57.6
LP38	3.67005	1.04	0.845	77.9	26.8	173	9.9	281.4	61.2
LP39	3.638155	1.041	0.632	50.7	15.1	147	21.8	288.7	63
LP40	3.766338	1.04	0.588	40.1	8	133.6	23.9	292.8	64.6
LP41	3.57215	1.042	0.351	34	0	124	24.7	304	65.3
LP42	3.395839	1.038	0.351	211.4	5.2	119.2	23.4	313.1	65.9
LP43	3.493606	1.034	0.192	199.7	12.3	104.7	21.9	317.1	64.6
LP44	3.694549	1.032	0.218	202.9	14.7	105.2	27	318.4	58.6
LP45	3.705798	1.039	0.351	222.9	6.3	127.1	42.5	319.6	46.8
LP46	3.48533	1.036	0.289	226.9	1.3	135.8	41.1	318.3	48.8
LP47	3.724659	1.03	0.332	208.6	13.6	111.1	28.3	321.4	58
LP48	3.637463	1.031	0.388	202.3	11.1	107.8	21.5	317.8	65.5
LP49	3.685379	1.035	0.317	198.9	6.6	106.5	20.1	306.1	68.8
LP50	3.452803	1.037	0.4	208.8	1.1	118.4	21.7	301.5	68.3
LP51	3.517408	1.042	0.367	32	1.1	122.5	24	299.5	66
LP52	3.562284	1.041	0.62	36.3	8.8	130.2	23.6	287.1	64.6
LP53	3.557924	1.044	0.601	30.1	7.5	123.4	23.9	283.9	64.8
LP54	3.84568	1.04	0.795	19.6	5.7	112.8	29.3	279.7	60
LP55	3.874513	1.04	0.85	79.6	32.3	176.9	11.3	283.6	55.4
LP56	3.616725	1.04	0.491	83.4	33.4	183.1	14.3	292.7	52.9
LP57	3.503095	1.035	-0.01	75	26	181.9	30.7	312.6	47.7
LP58	3.389275	1.035	-0.177	72	18.9	177	37.1	320.6	46.8
LP59	3.544656	1.035	0.662	83.9	29.8	185.4	19.3	303.5	53.4

Prisme de La Palisse									
Echantillon	Km.10-3 SI	P'	T	K1dec	K1inc	K2dec	K2inc	K3dec	K3inc
LP60	3.503736	1.036	0.731	25.2	4.2	118	33.8	289.1	55.9
LP61	3.581154	1.038	0.567	29.5	10.8	125.5	28.9	281.1	58.8
LP62	3.539789	1.041	0.554	31.8	7.9	125.3	23.6	284.6	65
LP63	3.625087	1.044	0.472	38.5	6.6	131.7	25.3	294.9	63.7
LP64	3.440191	1.041	0.354	32.4	0.7	122.6	21.9	300.7	68.1
LP65	3.616735	1.039	0.344	211.6	3.5	120.2	20.7	310.8	69
LP66	3.592548	1.038	0.404	213.4	6	121.1	20.6	318.8	68.5
LP67	3.621604	1.033	0.528	209.2	9.2	115.5	21.9	320.5	66.1
LP68	3.440134	1.029	0.578	211.9	11.9	115.9	26.3	324.1	60.7
LP69	3.565842	1.032	0.218	228.4	5.5	134.7	33.6	326.6	55.8
LP70	3.6368	1.027	0.365	240.4	5.8	147.6	25.7	342.2	63.6
LP71	3.71118	1.029	0.347	54.2	0	144.2	23.6	324.2	66.4
LP72	3.427296	1.033	0.378	221.1	1.4	130.4	24.5	314	65.5
LP73	3.671891	1.037	0.4	40.1	0.8	130.5	22.2	308.2	67.8
LP74	3.519486	1.04	0.356	36.6	0.3	126.7	18.9	305.8	71.1
LP75	3.66978	1.041	0.297	31.8	0.7	122.1	23.1	300.1	66.9
LP76	3.447848	1.044	0.379	34.4	6	127.4	26.7	292.8	62.6
LP77	3.420486	1.041	0.37	28.5	5.5	121.3	26.9	287.8	62.4
LP78	3.702707	1.039	0.313	28.1	7.7	122.7	30.6	285.5	58.2
LP79	3.779707	1.037	0.337	28	4	120.7	33.7	292.1	56
LP80	3.499401	1.031	0.516	44.1	13.2	143.8	35.7	297.1	51.2
LP81	3.448652	1.03	-0.076	69.7	9.9	169.4	43.9	329.9	44.4
LP82	3.685674	1.034	0.178	79.1	21.6	178.8	23.1	310.8	57.4
LP83	3.69634	1.039	0.411	57.8	23.7	161.5	28.2	294.1	51.6
LP84	3.892767	1.042	0.314	36.8	11.3	134.2	32.8	290.3	54.9
LP85	3.816045	1.039	0.304	35.6	10.3	131.6	29.9	288.6	58.1
LP86	3.728656	1.041	0.367	36.1	7.8	130.2	27.6	291.8	61.2
LP87	3.504361	1.042	0.372	33.4	1.8	124.3	27.6	300	62.3
LP88	3.379872	1.041	0.314	32.2	0.1	122.3	24.4	301.9	65.6
LP89	3.659734	1.039	0.334	35.8	1.1	126.3	21.1	303	68.9
LP90	3.617573	1.035	0.268	37.1	2	128.1	27	303.1	62.9
LP91	3.746238	1.037	0.166	46.1	3	137.6	26.4	310.2	63.4
LP92	3.543951	1.029	0.039	49.6	3	141.1	27.5	313.9	62.3
LP93	3.633103	1.024	-0.038	61.5	1.6	152.4	28.9	328.6	61.1
LP94	3.489293	1.024	0.91	95.8	17.5	190.3	14	316.9	67.3
LP95	3.478404	1.028	0.073	42.8	2.8	134.3	29.9	308	60
LP96	3.534493	1.032	-0.12	40.4	4	132.6	29.2	303.3	60.4
LP97	3.484981	1.038	0.083	39.9	7.6	133.7	26.4	295.2	62.3
LP98	3.596705	1.037	0.224	39.2	2.3	130.2	23	303.7	66.9
LP99	3.332534	1.037	0.271	37.9	1.9	128.8	24.4	303.7	65.5
LP100	3.685104	1.042	0.36	40.1	3.7	132	27.1	303	62.6
LP101	3.736128	1.041	0.334	42.7	11.6	138.3	25.6	290.4	61.6
LP102	3.7862	1.039	0.339	44.2	9.6	140.1	31.1	299.1	57.1
LP103	3.761998	1.041	0.417	45.4	17.6	146.8	32	291.1	52.4
LP104	3.734577	1.041	0.544	67	28	170.8	24.2	295.2	51.5
LP105	3.649089	1.042	0.291	77.8	25.3	177.9	20.3	302.1	56.6
LP106	3.668506	1.039	0.354	74.7	28	173.6	16.2	290.1	56.9
LP107	3.711371	1.041	0.559	60.3	26.8	166.3	28.6	295	48.9
LP108	3.826695	1.041	0.471	54.1	20.4	158	32.8	297.9	49.8
LP109	3.441995	1.036	0.382	51.2	15.2	151.2	32.6	300	53.2
LP110	3.353507	1.037	0.249	54.9	16.2	152.3	23.8	293.9	60.6
LP111	3.59169	1.035	0.24	49	12.9	145.5	26.2	295.2	60.3
LP112	3.521871	1.032	0.286	40	5.4	132.3	23.3	297.7	66
LP113	3.489357	1.034	0.143	38.8	3.6	130	19.1	298.5	70.5
LP114	3.375378	1.034	-0.128	35.9	6.6	127.7	15.5	283.6	73.1
LP115	3.387898	1.026	-0.364	32.9	6.6	125.1	18.4	283.9	70.3

# Prisme de La Palisse

Echantillon	Km.10-3 SI	P'	T	K1dec	K1inc	K2dec	K2inc	K3dec	K3inc
LP116	3.574159	1.022	0.814	190.8	5.4	98.6	22.2	293.8	67.1
LP119	3.522394	1.021	0.204	31.4	7.3	123.2	14.1	274.6	74
LP120	3.382121	1.03	-0.269	28.1	5.8	119.5	13.9	276.1	74.9
LP121	3.460092	1.03	0.101	35.5	7.8	127.5	14.1	277.3	73.9
LP122	3.387544	1.03	0.367	44.5	9.7	139.1	25.1	295.1	62.8
LP123	3.379173	1.029	0.226	51.8	17.3	150.4	25.7	291.6	58.3
LP124	3.647938	1.03	0.148	60.6	16.4	158.6	25.1	300.8	59.3
LP125	3.522379	1.031	0.225	58.4	22	161	28.5	296.4	52.7
LP126	3.481835	1.033	0.29	59.3	23.1	163.7	30.2	298.3	50.3
LP127	3.34399	1.041	0.284	61.9	31.8	169.9	26.5	291.4	46.3
LP128	3.232886	1.043	0.293	65.4	32.7	164	13.1	272.8	54.1
LP130	3.231868	1.041	0.427	41.4	30.5	148.7	26.8	271.8	47.2
LP131	3.840991	1.036	0.335	38.3	25.3	144	29.9	275.4	49
LP132	3.847506	1.035	0.212	35.6	21.1	139.2	31.3	277.4	50.8
LP133	3.652084	1.03	0.155	39.3	17.3	140.4	31.8	285.1	52.8
LP134	3.562492	1.027	0.099	44.3	18.8	149.2	37.2	293.1	46.8
LP135	3.347566	1.028	0.036	32	12.4	130	32.7	284.1	54.5
LP136	3.642395	1.028	0.08	24.5	8.7	116.7	14.3	264.1	73.2
LP137	3.532593	1.027	-0.094	16.8	5.8	108.2	13.8	264.7	75
LP138	3.23468	1.023	0.563	26.4	4	118.4	25.6	288.1	64
LP139	3.143225	1.027	0.226	22.9	6.2	115.5	22.7	278.7	66.4
LP140	3.434881	1.032	0.068	27.6	7.3	120.1	18.8	277.3	69.7

# Prisme de Saint-Arcons-d'Allier

Name	Km.10-3 SI	P'	T	K1dec	K1inc	K2dec	K2inc	K3dec	K3inc
SAC205	3.66	1.138	0.032	338.2	9.9	243	27.2	86.4	60.7
SAC2006	4.49	1.039	0.554	112.1	12.1	16.1	25.9	224.8	61
SAC2007	6.29	1.027	-0.459	40.2	13.2	150.6	56.1	302.3	30.6
SAC2008	2.34	1.033	-0.064	28.2	17.6	123	14.7	250.7	66.7
SAC2009	1.76	1.098	-0.43	232.8	31.8	142.4	0.6	51.5	58.2
SAC2010	1.84	1.009	0.455	201.3	7.4	303.3	58	106.8	30.9
SAC2013	2.39	1.229	0.051	99.3	7.2	9	1.9	264.4	82.5
SAC2014	2.43	1.337	0.148	278.6	37.4	164.4	28.3	47.9	39.7
SAC2015	1.61	1.019	-0.358	39.7	17	154.8	54.3	299.4	30.3
SAC2016	2.27	1.013	-0.672	8.9	17.1	101.2	7.4	213.6	71.2
SAC2017	6.27	1.264	-0.205	230.6	30.8	116.1	34.8	350.6	40
SAC2018	2.66	1.008	-0.605	347.5	13.1	78.5	4	185.2	76.3
SAC2019	3.19	1.094	0.296	44.2	16.4	136.1	6.4	246.5	72.3
SAC2020	12.44	1.076	0.1	54.9	5.2	145.2	3.7	270.2	83.6
SAC2021	3.02	1.019	-0.378	19.1	3.6	287.6	23	117.5	66.7
SAC2023	3.61	1.017	0.094	337.7	11.3	81.2	49.3	238.5	38.4
4SAC2024	2.25	1.025	0.463	179.2	3.1	87.8	23.8	276.2	66
SAC2025	1.58	1.571	0.157	264	0.6	173.9	2.5	8.1	87.4
SAC2026	1.93	1.021	-0.072	355.1	27.6	249.4	27.3	122.5	49.3
SAC2027	2.89	1.204	0.09	81	12.4	172.9	8.6	296.7	74.8

**Prisme de Saint-Arcons-d'Allier**

Name	Km.10-3 SI	P'	T	K1dec	K1inc	K2dec	K2inc	K3dec	K3inc
SAC2028	8.34	1.408	0.085	136.3	4.1	227	10.5	25	78.7
SAC2029	3.86	1.026	-0.599	177.4	13	313.7	72.3	84.7	11.8
SAC2030	3.27	1.015	-0.495	357.9	6.6	91	25.6	254.6	63.4
SAC2031	2.75	1.067	0.49	291.3	13.3	21.5	1.2	116.5	76.7
SAC2032	6.56	1.202	-0.153	40	2.6	309.5	11.2	143	78.5
SAC2034	2.51	1.02	0.585	8	14.1	101.4	13.1	232.6	70.6
SAC2035	11.00	1.437	-0.012	292.9	17.2	26	9.9	144.6	70
SAC2036	4.50	1.027	-0.738	0.1	6.2	94.2	33.3	260.9	55.9
SAC2037	4.28	1.032	-0.271	21.9	16.9	289.3	8.5	173.7	71
SAC2038	4.39	1.082	-0.529	356.9	9.4	90.9	23.1	246.3	64.9
SAC2039	3.73	1.016	-0.455	5.7	19.2	100.4	13.4	223.4	66.3
SAC2040	4.26	1.082	0.598	52.5	1	322.5	2.8	162.6	87
SAC241	3.50	1.052	0.446	159.3	8.1	67.7	11	284.7	76.3
SAC2042	2.27	1.009	0.379	315.9	11.9	224.9	4.9	112.7	77.1
SAC2045	2.64	1.015	-0.208	12	18.1	111.2	25.9	251	57.6
SAC2046	4.53	1.022	-0.234	9	16.8	105.3	20	241.9	63.4
SAC2047	4.73	1.026	-0.442	358.7	15.8	240.2	59.3	96.5	25.6
SAC2048	5.95	1.259	0.382	32.9	5	302.8	1	201.3	84.9
SAC2049	4.43	1.024	-0.381	8.2	15.1	108.5	33.5	257.7	52.4
SAC2050	4.09	1.021	-0.542	15.9	22.4	113.6	18	238.8	60.7
SAC2051	4.09	1.069	-0.316	31.5	22.9	133.6	26.3	266.2	53.8
SAC2052	3.19	1.017	-0.781	6.5	12.1	102	24	252	62.8
SAC2053	1.81	1.006	0.636	169	4.6	265.8	55.5	75.9	34.1
SAC2055	9.42	1.858	-0.297	311.1	4.1	41.7	8.9	196.8	80.2
SAC2056	4.63	1.021	-0.096	21.7	5.4	288.4	31.4	120.3	58
SAC2057	7.10	1.14	0.737	26.7	24.5	118.6	4	217.3	65.1
SAC2058	4.57	1.028	-0.07	32.4	25.8	129.1	13.6	244.2	60.3
SAC2059	4.43	1.021	-0.187	0.7	15.6	90.9	0.6	183.1	74.4
SAC2060	5.20	1.042	0.452	319.2	12.3	202.8	63.9	54.5	22.7
SAC2061	4.01	1.017	-0.789	6.3	16.2	106.1	30.4	252.1	54.7
SAC2062	3.46	1.057	-0.047	30.5	24.7	131	21.6	257.1	56.2
SAC2063	4.53	1.92	0.081	340.2	6.8	70.2	0.2	161.8	83.2
SAC2065	2.56	1.014	0.71	24.5	25.9	120	11.2	231.3	61.4
SAC2066	4.00	1.02	-0.289	348.4	25.2	254.8	7.6	149.2	63.6
SAC2067	4.94	1.074	0.023	346.3	26.7	238.4	31.5	108.2	46.5
SAC2068	6.29	1.121	0.604	85.5	2.2	353.9	35.1	178.6	54.8
SAC2069	4.21	1.014	-0.096	357.3	23.2	88.2	2.3	183.6	66.7
SAC2070	7.31	1.21	0.142	348.3	17.7	81.9	11.3	203	68.8
SAC2071	3.84	1.015	-0.047	11.6	20.6	272.9	21.8	140.8	59.3
SAC2072	2.70	1.017	0.116	331.8	10.6	63	6.4	183.8	77.6
SAC2074	2.00	1.027	0.197	186.3	9.1	282.6	34.3	83.5	54.2
SAC2075	3.79	1.207	0.389	230.6	17.2	327.4	20.8	104.1	62.5
SAC2076	2.60	1.018	0.168	8.5	15.1	278.1	1.6	182.4	74.8
SAC2077	4.22	1.371	-0.574	23	13.5	158.7	71.5	289.9	12.5
SAC2078	2.50	1.03	0.111	88.1	11.8	353.3	21.6	204.7	65.1
SAC2079	2.42	1.038	0.047	329.7	29.8	68.4	14.9	181.6	56
SAC2080	2.85	1.259	0.146	119.7	5.5	209.8	1.3	313.5	84.3
SAC2081	2.14	1.1	0.211	201	9.3	291.1	0.7	25.1	80.7



- Paramètre d'hystérésis :

**Prisme Saint-Arcons-d'Allier**

	$H_c$	$M_s$	$M_r$	$H_{cr}$	$M_r/M_s$	$H_{cr}/H_c$	mass	$M_s/\text{mass}$	$M_r/\text{mass}$
Echantillons	$mT$	$mAm^2$	$mAm^2$	$mT$			$g$	$Am^2/kg$	$Am^2/kg$
SAC001	10.83	2.723	1.075	13.87	0.395	1.281	10.95	0.249	0.098
SAC002	12.03	3.666	1.259	18.13	0.343	1.507	19.33	0.190	0.065
SAC003	14.29	3.423	1.15	23.43	0.336	1.640	17.34	0.197	0.066
SAC004	14.33	1.979	0.75	22.03	0.379	1.537	10.59	0.187	0.071
SAC005	15.37	2.775	1.145	21.98	0.413	1.430	15.76	0.176	0.073
SAC006	17.91	2.382	1.024	25.63	0.430	1.431	15.41	0.155	0.066
SAC007	17.36	2.518	1.06	24.82	0.421	1.430	15.28	0.165	0.069
SAC008	14.38	2.735	1.031	23.66	0.377	1.645	15.33	0.178	0.067
SAC009	15.61	3.068	1.165	24.33	0.380	1.559	16.08	0.191	0.072
SAC010	19.3	2.449	1.062	27.21	0.434	1.410	15.91	0.154	0.067
SAC011	14.75	2.306	0.911	22.12	0.395	1.500	12.12	0.190	0.075
SAC012	12.82	2.156	0.829	17.97	0.385	1.402	9.33	0.231	0.089
SAC013	18.26	2.866	1.11	28.11	0.387	1.539	16.02	0.179	0.069
SAC014	11.6	5.549	1.295	24.14	0.233	2.081	16.44	0.338	0.079
SAC015	13.86	2.655	0.955	24.03	0.360	1.734	15.32	0.173	0.062
SAC016	13.72	2.871	0.936	33.91	0.326	2.472	16.58	0.173	0.056
SAC017	6.209	8.038	0.991	26.49	0.123	4.266	16.73	0.480	0.059
SAC018	14.52	2.678	0.866	36.3	0.323	2.500	15.96	0.168	0.054
SAC019	13.39	3.071	1.035	28.84	0.337	2.154	16.06	0.191	0.064
SAC020	17.15	2.756	1.124	24.85	0.408	1.449	15.94	0.173	0.071
SAC021	20.82	2.369	1.043	29.93	0.440	1.438	16.18	0.146	0.064
SAC022	11.18	2.36	0.78	16.14	0.331	1.444	10.25	0.230	0.076
SAC023	17.06	3.01	1.129	24.85	0.375	1.457	16.18	0.186	0.070
SAC024	13.39	3.416	1.159	20.63	0.339	1.541	16.17	0.211	0.072
SAC025	8.031	4.908	1.129	22.35	0.230	2.783	16.74	0.293	0.067
SAC026	11.59	2.954	0.799	31.91	0.270	2.753	15.36	0.192	0.052
SAC027	8.127	3.543	0.745	31.42	0.210	3.866	15.43	0.230	0.048
SAC028	6.792	3.771	0.656	31.73	0.174	4.672	15.93	0.237	0.041
SAC029	11.91	2.999	0.774	32.97	0.258	2.768	16.99	0.177	0.046
SAC030	12.96	2.831	0.832	33.2	0.294	2.562	16.1	0.176	0.052
SAC031	13.11	2.632	0.943	23.22	0.358	1.771	16.35	0.161	0.058
SAC032	13.27	3.448	0.965	24.1	0.280	1.816	15.78	0.219	0.061
SAC033	13.24	1.943	0.684	19.69	0.352	1.487	11.32	0.172	0.060
SAC034	15.74	3.047	1.105	23.01	0.363	1.462	15.93	0.191	0.069
SAC035	7.213	5.533	1.115	22.18	0.202	3.075	16.62	0.333	0.067
SAC036	9.705	3.454	0.838	31.47	0.243	3.243	16.1	0.215	0.052
SAC037	11.83	2.963	0.746	32.53	0.252	2.750	15.83	0.187	0.047
SAC038	11.92	2.919	0.72	32.87	0.247	2.758	15.96	0.183	0.045
SAC039	13.28	2.636	0.695	33.4	0.264	2.515	15.9	0.166	0.044
SAC040	12.68	2.994	0.787	33.6	0.263	2.650	16.74	0.179	0.047
SAC041	13.26	2.68	0.8	33.39	0.299	2.518	16.09	0.167	0.050
SAC042	14.42	2.698	1.07	22.65	0.397	1.571	15.93	0.169	0.067
SAC043	16.86	2.553	1.092	24.17	0.428	1.434	15.06	0.170	0.073
SAC044	13.36	1.919	0.677	19.84	0.353	1.485	11.7	0.164	0.058
SAC045	14.75	3.011	1.117	21.52	0.371	1.459	14.9	0.202	0.075
SAC046	11.06	3.435	0.989	28.5	0.288	2.577	16.24	0.212	0.061
SAC047	11.13	3.22	0.802	32.29	0.249	2.901	16.37	0.197	0.049

**Prisme Saint-Arcons-d'Allier**

	H <sub>c</sub>	M <sub>s</sub>	M <sub>r</sub>	H <sub>cr</sub>	M <sub>r</sub> /M <sub>s</sub>	H <sub>cr</sub> /H <sub>c</sub>	mass	M <sub>s</sub> /mass	M <sub>r</sub> /mass
Echantillons	mT	mAm <sup>2</sup>	mAm <sup>2</sup>	mT			g	Am <sup>2</sup> /kg	Am <sup>2</sup> /kg
SAC048	9.47	3.374	0.744	31.8	0.221	3.358	16.11	0.209	0.046
SAC049	11.49	2.901	0.704	32.47	0.243	2.826	16.19	0.179	0.043
SAC050	12.78	2.726	0.701	33.13	0.257	2.592	16.38	0.166	0.043
SAC051	12.45	2.98	0.778	33.39	0.261	2.682	16.55	0.180	0.047
SAC052	12.26	2.972	0.89	31.02	0.299	2.530	16.05	0.185	0.055
SAC053	15.85	2.803	1.116	23.2	0.398	1.464	16.03	0.175	0.070
SAC054	13.61	1.907	0.682	20.29	0.358	1.491	10.83	0.176	0.063
SAC055	8.549	5.264	1.176	21.08	0.223	2.466	15.63	0.337	0.075
SAC056	9.578	3.74	1.015	25.61	0.271	2.674	16.43	0.228	0.062
SAC057	6.395	5.378	0.91	28.41	0.169	4.443	16.67	0.323	0.055
SAC058	9.719	3.356	0.788	32.04	0.235	3.297	15.98	0.210	0.049
SAC059	10.08	3.293	0.789	32.33	0.240	3.207	15.98	0.206	0.049
SAC060	7.934	4.377	0.848	31.11	0.194	3.921	16.35	0.268	0.052
SAC061	11.4	3.334	0.869	32.91	0.261	2.887	16.6	0.201	0.052
SAC062	11.85	3.328	1.035	26.06	0.311	2.199	16.3	0.204	0.063
SAC063	11.88	4.235	1.202	23.24	0.284	1.956	16.26	0.260	0.074
SAC064	13.63	2.034	0.734	20.13	0.361	1.477	11.63	0.175	0.063
SAC065	15.3	3.225	1.158	22.42	0.359	1.465	15.42	0.209	0.075
SAC066	10.95	3.728	1.102	22.84	0.296	2.086	15.92	0.234	0.069
SAC067	9.603	4.031	1.028	27.47	0.255	2.861	16.21	0.249	0.063
SAC068	8.287	4.746	1.03	27.09	0.217	3.269	16.85	0.282	0.061
SAC069	11.03	3.498	0.985	29.02	0.282	2.631	16.58	0.211	0.059
SAC070	9.131	4.075	0.944	27.35	0.232	2.995	15.53	0.262	0.061
SAC071	11.42	3.492	1.046	27.5	0.300	2.408	16.68	0.209	0.063
SAC072	13.48	3.269	1.175	21.18	0.359	1.571	16.6	0.197	0.071
SAC073	16.95	2.66	1.088	24.02	0.409	1.417	16.15	0.165	0.067
SAC074	16.88	2.901	1.087	24.81	0.375	1.470	15.35	0.189	0.071
SAC075	14.03	3.785	1.211	22.27	0.320	1.587	15.46	0.245	0.078
SAC076	15.01	3.395	1.218	21.97	0.359	1.464	15.56	0.218	0.078
SAC077	13.04	4.412	1.244	21.48	0.282	1.647	15.43	0.286	0.081
SAC078	15.01	3.372	1.216	22.17	0.361	1.477	15.6	0.216	0.078
SAC079	15.32	3.163	1.162	22.29	0.367	1.455	15.78	0.200	0.074
SAC080	15.9	3.319	1.228	23.4	0.370	1.472	16.78	0.198	0.073
SAC081	17.75	2.969	1.176	25.59	0.396	1.442	16.73	0.177	0.070
SAC082	12.41	1.427	0.507	17.83	0.355	1.437	8.08	0.177	0.063
SAC083	13.57	1.298	0.468	19.78	0.361	1.458	8.44	0.154	0.055
SAC084	13.4	1.334	0.456	20.28	0.342	1.513	7.88	0.169	0.058
SAC085	12.48	1.395	0.446	20.11	0.320	1.611	7.81	0.179	0.057
SAC086	13.47	1.092	0.391	19.87	0.358	1.475	6.71	0.163	0.058
SAC087	13.38	0.957	0.341	19.62	0.356	1.466	6.01	0.159	0.057
SAC088	8.926	1.306	0.298	18.26	0.228	2.046	5.28	0.247	0.056
SAC089	12.04	0.726	0.261	17.37	0.360	1.443	4.84	0.150	0.054

Prisme La Palisse

Echantillons	H <sub>c</sub>	M <sub>s</sub>	M <sub>r</sub>	H <sub>cr</sub>	M <sub>r</sub> /M <sub>s</sub>	H <sub>cr</sub> /H <sub>c</sub>	mass	M <sub>s</sub> /mass	M <sub>r</sub> /mass
	<i>mT</i>	<i>mAm<sup>2</sup></i>	<i>mAm<sup>2</sup></i>	<i>mT</i>			<i>g</i>	<i>Am<sup>2</sup>/kg</i>	<i>Am<sup>2</sup>/kg</i>
LP1	6.079	18.23	2.606	10.62	0.143	1.747	14.05	1.298	0.185
LP2	5.912	20.62	2.914	10.16	0.141	1.719	18.11	1.139	0.161
LP3	5.864	18.38	2.612	9.907	0.142	1.689	16.65	1.104	0.157
LP4	5.892	20.85	2.957	10.09	0.142	1.712	19.86	1.050	0.149
LP5	5.826	23.4	3.296	9.792	0.141	1.681	22.13	1.057	0.149
LP6	5.835	24.25	3.403	9.858	0.140	1.689	18.08	1.341	0.188
LP7	5.873	23.22	3.278	9.935	0.141	1.692	21.86	1.062	0.150
LP8	4.474	14.23	2.926	9.919	0.206	2.217	20.97	0.679	0.140
LP8-1	6.078	19.31	2.748	10.61	0.142	1.746	13.18	1.465	0.208
LP9	5.85	24.05	3.382	9.881	0.141	1.689	21.53	1.117	0.157
LP10	5.85	21.44	3.041	9.835	0.142	1.681	22.53	0.952	0.135
LP11	5.838	20.41	2.856	9.941	0.140	1.703	22.56	0.905	0.127
LP12	5.831	23.78	3.326	9.961	0.140	1.708	21.71	1.095	0.153
LP13	5.866	22.62	3.158	10.1	0.140	1.722	18.39	1.230	0.172
LP14	5.837	23.36	3.237	9.948	0.139	1.704	21.76	1.074	0.149
LP15	5.799	20.56	2.878	9.791	0.140	1.688	21.29	0.966	0.135
LP16	5.793	24.62	3.444	9.811	0.140	1.694	22.64	1.087	0.152
LP17	5.806	23.19	3.241	9.869	0.140	1.700	21.83	1.062	0.148
LP18	5.818	21.95	3.077	9.89	0.140	1.700	20.83	1.054	0.148
LP19	5.826	21.21	2.964	9.941	0.140	1.706	21.47	0.988	0.138
LP20	5.871	23.63	3.284	10.09	0.139	1.719	21.80	1.084	0.151
LP21	5.823	25.07	3.516	9.967	0.140	1.712	21.70	1.155	0.162
LP22	5.855	17.99	2.502	9.982	0.139	1.705	22.64	0.794	0.110
LP23	5.835	22.46	3.16	9.858	0.141	1.689	20.80	1.080	0.152
LP23-1	5.914	10.75	1.502	10.23	0.140	1.730	12.01	0.895	0.125
LP24	5.937	21.3	3.023	10.09	0.142	1.700	19.37	1.100	0.156
LP25	5.928	22.1	3.116	10.08	0.141	1.700	22.63	0.977	0.138
LP26	5.947	24.54	3.458	10.2	0.141	1.715	21.18	1.159	0.163
LP27	5.922	23.72	3.331	10.14	0.140	1.712	21.83	1.087	0.153
LP28	5.937	23.37	3.294	10.16	0.141	1.711	21.95	1.065	0.150
LP29	5.924	22.31	3.146	10.14	0.141	1.712	19.78	1.128	0.159
LP30	5.944	20.65	2.916	10.18	0.141	1.713	22.04	0.937	0.132
LP31	5.906	25.76	3.63	10.04	0.141	1.700	22.68	1.136	0.160
LP32	5.889	23.62	3.327	9.948	0.141	1.689	21.42	1.103	0.155
LP33	5.869	21.35	2.992	9.927	0.140	1.691	21.81	0.979	0.137
LP34	5.885	24.18	3.395	9.988	0.140	1.697	20.14	1.201	0.169
LP35	5.905	19.5	2.759	9.989	0.141	1.692	19.61	0.994	0.141
LP36	5.897	21.22	2.996	9.957	0.141	1.688	20.53	1.034	0.146
LP37	5.907	23.35	3.3	10.03	0.141	1.698	22.32	1.046	0.148
LP38	5.891	21.79	3.063	9.987	0.141	1.695	21.91	0.995	0.140
LP39	5.915	23.56	3.324	10.07	0.141	1.702	21.93	1.074	0.152
LP39-1	5.936	5.607	0.68	9.907	0.121	1.669	17.13	0.327	0.040
LP40	5.909	24.38	3.42	10.09	0.140	1.708	22.56	1.081	0.152
LP41	5.93	13.49	1.903	10.04	0.141	1.693	21.40	0.630	0.089
LP42	5.968	21.56	3.064	10.13	0.142	1.697	20.44	1.055	0.150
LP43	5.928	22.48	3.169	10.25	0.141	1.729	21.14	1.063	0.150
LP44	5.951	24.27	3.424	10.22	0.141	1.717	22.07	1.100	0.155

Prisme La Palisse

Echantillons	$H_c$ <i>mT</i>	$M_s$ <i>mAm<sup>2</sup></i>	$M_r$ <i>mAm<sup>2</sup></i>	$H_{cr}$ <i>mT</i>	$M_r/M_s$	$H_{cr}/H_c$	mass <i>g</i>	$M_s/\text{mass}$ <i>Am<sup>2</sup>/kg</i>	$M_r/\text{mass}$ <i>Am<sup>2</sup>/kg</i>
LP45	5.954	23.77	3.361	10.1	0.141	1.696	22.18	1.072	0.152
LP45-1	6.023	9.98	1.404	10.31	0.141	1.712	14.65	0.681	0.096
LP46	5.849	20.22	2.835	9.978	0.140	1.706	20.92	0.967	0.136
LP47	5.866	24.73	2.99	10.07	0.121	1.717	22.27	1.111	0.134
LP49	5.809	24.38	3.398	10.1	0.139	1.739	21.99	1.109	0.155
LP50	5.814	21.92	3.063	9.925	0.140	1.707	22.17	0.989	0.138
LP51	5.825	23.64	3.314	9.932	0.140	1.705	20.70	1.142	0.160
LP52	5.859	23.11	3.259	9.944	0.141	1.697	21.00	1.101	0.155
LP53	5.883	23.68	3.326	10.03	0.140	1.705	21.20	1.117	0.157
LP54	5.865	24	3.374	9.979	0.141	1.701	21.44	1.119	0.157
LP55	5.879	21.86	3.074	10.01	0.141	1.703	23.12	0.946	0.133
LP56	5.886	23.38	3.291	9.935	0.141	1.688	23.17	1.009	0.142
LP57	5.942	22.31	3.13	10.13	0.140	1.705	21.84	1.022	0.143
LP58	5.886	23.91	3.375	10.01	0.141	1.701	21.03	1.137	0.161
LP59	5.911	21.04	2.953	10.08	0.140	1.705	20.14	1.045	0.147
LP60	5.95	20.34	2.83	10.27	0.139	1.726	21.10	0.964	0.134
LP61	5.85	19.14	2.668	9.993	0.139	1.708	21.17	0.904	0.126
LP62	5.931	22.47	3.132	10.16	0.139	1.713	21.54	1.043	0.145
LP63	5.852	22.27	3.142	9.94	0.141	1.699	21.36	1.043	0.147
LP64	5.888	22.98	3.244	10.03	0.141	1.703	21.52	1.068	0.151
LP65	5.855	21.14	2.976	9.965	0.141	1.702	20.40	1.036	0.146
LP66	5.881	25.55	3.587	10.04	0.140	1.707	21.41	1.193	0.168
LP67	5.901	25.38	3.547	10.23	0.140	1.734	21.50	1.180	0.165
LP68	5.957	23.4	3.27	10.4	0.140	1.746	21.64	1.081	0.151
LP69	5.912	24.89	3.514	10.08	0.141	1.705	20.70	1.203	0.170
LP70	5.961	22.34	3.143	10.4	0.141	1.745	21.35	1.046	0.147
LP71	5.936	24.36	3.413	10.37	0.140	1.747	22.06	1.104	0.155
LP72	5.902	17.83	2.496	10.24	0.140	1.735	22.37	0.797	0.112
LP73	5.905	22.62	3.136	10.22	0.139	1.731	20.52	1.102	0.153
LP74	5.837	19.21	2.696	9.943	0.140	1.703	21.93	0.876	0.123
LP75	5.881	20.5	2.871	10.02	0.140	1.704	21.06	0.973	0.136
LP76	5.852	22.64	3.16	10.01	0.140	1.711	21.67	1.045	0.146
LP77	5.863	23.87	3.356	9.947	0.141	1.697	20.44	1.168	0.164
LP78	5.889	23.81	3.338	10.09	0.140	1.713	20.35	1.170	0.164
LP79	5.944	23.67	3.292	10.27	0.139	1.728	22.28	1.063	0.148
LP80	5.913	21.38	3	10.12	0.140	1.711	22.65	0.944	0.132
LP81	5.913	22.88	3.226	10.17	0.141	1.720	20.89	1.095	0.154
LP82	5.956	14.27	2.027	10.27	0.142	1.724	20.42	0.699	0.099
LP83	5.903	23.12	3.235	10.17	0.140	1.723	22.11	1.046	0.146
LP84	5.885	24.84	3.481	10.15	0.140	1.725	21.89	1.135	0.159
LP85	5.883	25.44	3.553	10.09	0.140	1.715	23.38	1.088	0.152
LP86	5.868	20.17	2.826	10.01	0.140	1.706	23.00	0.877	0.123
LP87	5.869	24.11	3.372	10.04	0.140	1.711	22.15	1.088	0.152
LP88	5.908	21.21	2.98	10.12	0.140	1.713	20.72	1.024	0.144
LP89	5.844	23.25	3.257	10.02	0.140	1.715	20.14	1.154	0.162
LP90	5.863	18.35	2.558	10.04	0.139	1.712	21.87	0.839	0.117
LP91	5.873	23.56	3.284	10.16	0.139	1.730	21.52	1.095	0.153

Prisme La Palisse

	H <sub>c</sub>	M <sub>s</sub>	M <sub>r</sub>	H <sub>cr</sub>	M <sub>r</sub> /M <sub>s</sub>	H <sub>cr</sub> /H <sub>c</sub>	mass	M <sub>s</sub> /mass	M <sub>r</sub> /mass
Echantillons	mT	mAm <sup>2</sup>	mAm <sup>2</sup>	mT			g	Am <sup>2</sup> /kg	Am <sup>2</sup> /kg
LP92	5.931	24.14	3.362	10.4	0.139	1.753	22.44	1.076	0.150
LP93	5.953	23.52	3.284	10.4	0.140	1.747	21.43	1.098	0.153
LP94	5.915	22.86	3.217	10.08	0.141	1.704	21.88	1.045	0.147
LP95	5.962	22.71	3.176	10.35	0.140	1.736	20.94	1.084	0.152
LP96	5.953	20.91	2.888	10.58	0.138	1.777	21.03	0.994	0.137
LP97	5.861	23.2	3.216	10.17	0.139	1.735	21.24	1.092	0.151
LP98	5.838	22.36	3.113	10.06	0.139	1.723	20.96	1.067	0.149
LP99	5.919	21.52	3.019	10.21	0.140	1.725	21.34	1.008	0.141
LP100	5.87	24.91	3.471	10.1	0.139	1.721	19.92	1.251	0.174
LP101	5.935	20.66	2.861	10.25	0.138	1.727	22.18	0.932	0.129
LP102	5.894	24.41	3.421	10.1	0.140	1.714	22.44	1.088	0.152
LP103	5.912	23.28	3.267	10.16	0.140	1.719	22.70	1.026	0.144
LP104	5.918	23.76	3.334	10.15	0.140	1.715	22.47	1.058	0.148
LP105	5.918	13.11	1.861	10.09	0.142	1.705	22.04	0.595	0.084
LP106	5.911	22.92	3.217	10.15	0.140	1.717	21.61	1.061	0.149
LP107	5.919	24.83	3.476	10.13	0.140	1.711	21.74	1.142	0.160
LP108	5.901	24.76	3.468	10.07	0.140	1.706	21.96	1.127	0.158
LP109	5.909	21.98	3.07	10.15	0.140	1.718	22.70	0.968	0.135
LP110	5.917	21.29	2.976	10.2	0.140	1.724	20.59	1.034	0.145
LP111	5.903	23.71	3.31	10.18	0.140	1.725	20.69	1.146	0.160
LP112	5.935	22.47	3.139	10.3	0.140	1.735	21.88	1.027	0.143
LP113	5.895	23.28	3.254	10.2	0.140	1.730	22.13	1.052	0.147
LP114	5.94	23.21	3.221	10.43	0.139	1.756	21.28	1.091	0.151
LP115	6.01	20.84	2.904	10.58	0.139	1.760	20.84	1.000	0.139
LP116	5.933	21.86	3.067	10.12	0.140	1.706	20.59	1.061	0.149
LP117	5.953	17.49	2.419	10.51	0.138	1.765	21.52	0.813	0.112
LP118	5.996	17.48	2.46	10.42	0.141	1.738	20.97	0.834	0.117
LP119	5.923	22.48	3.169	10.12	0.141	1.709	16.30	1.379	0.194
LP120	5.978	23.55	3.274	10.55	0.139	1.765	20.97	1.123	0.156
LP121	5.933	21.53	3.003	10.39	0.139	1.751	20.54	1.048	0.146
LP122	5.987	23.2	3.214	10.54	0.139	1.760	21.03	1.103	0.153
LP123	5.941	24.47	3.405	10.35	0.139	1.742	21.20	1.154	0.161
LP124	5.954	25.8	3.626	10.25	0.141	1.722	20.35	1.268	0.178
LP125	5.914	23.89	3.355	10.12	0.140	1.711	22.08	1.082	0.152
LP126	5.899	23.09	3.251	10.05	0.141	1.704	21.22	1.088	0.153
LP127	5.865	22.27	3.12	10.01	0.140	1.707	21.04	1.059	0.148
LP128	5.881	23.1	3.238	10.1	0.140	1.717	20.10	1.149	0.161
LP129	5.929	19.47	2.742	10.28	0.141	1.734	19.34	1.007	0.142
LP130	5.883	23.86	3.36	10.03	0.141	1.705	15.27	1.562	0.220
LP131	5.88	22.86	3.219	9.982	0.141	1.698	19.40	1.179	0.166
LP132	5.918	24.61	3.447	10.11	0.140	1.708	22.88	1.076	0.151
LP133	5.903	22.43	3.154	10.01	0.141	1.696	23.08	0.972	0.137
LP134	5.887	24.12	3.374	10.02	0.140	1.702	21.99	1.097	0.153
LP135	5.933	23.98	3.37	10.11	0.141	1.704	21.45	1.118	0.157
LP136	5.903	24.95	3.502	10.17	0.140	1.723	20.01	1.247	0.175
LP137	5.872	23.83	3.352	10.04	0.141	1.710	21.93	1.087	0.153
LP138	5.976	16.36	2.302	10.27	0.141	1.719	21.21	0.772	0.109
LP139	5.894	21.14	2.972	10.02	0.141	1.700	19.36	1.092	0.154
LP140	5.899	25.57	3.601	10.01	0.141	1.697	18.85	1.357	0.191
LP141	6.069	16.73	2.358	10.71	0.141	1.765	20.95	0.798	0.113
LP142	6.012	20.24	2.833	10.55	0.140	1.755	17.78	1.139	0.159

La coulée de La Palisse				La coulée de Saint-Arcons-d'Allier		
	Echantillons	Hcr/Hc	Mr/Ms	Echantillons	Hcr/Hc	Mr/Ms
Colonnade	08TB12C	2.132	0.135	STA-1-1A	1.968	0.158
	08TB12F	2.161	0.136	STA-1-1C	1.953	0.158
	08TB18B	2.035	0.143	STA-2-1A	1.966	0.162
	08TB18C	2.027	0.143	STA-2-1C	1.968	0.163
	08TB23B	2.330	0.129	STA-3-1A	1.935	0.164
Entablement	08TB23C	2.344	0.132	STA-3-1C	1.924	0.166
	08TB33B	2.473	0.154	STA-3-1D	1.933	0.165
	08TB33C	2.510	0.158	STA-4-3A	1.917	0.167
	08TB34B	2.275	0.122	STA-4-3C	1.923	0.169
	08TB34C	2.280	0.123	STA-4-3D	1.920	0.171
Fausse colonnade 1a	08TB39B	2.172	0.148			
	08TB39C	2.185	0.152			
	08TB52B	2.441	0.112			
	08TB52D	2.391	0.120			
Plan débit planaire	08TB57B	2.056	0.128			
	08TB57C	2.011	0.133			
	08TB59B	2.676	0.085			
	08TB59C	2.720	0.089			
Fausse colonnade 2	08TB68B	2.604	0.101			
	08TB68C	2.578	0.103			
	08TB74D	2.191	0.110			
	08TB74E	2.188	0.107			
Fausse colonnade 1b	08TB77B	2.516	0.148			
	08TB77C	2.288	0.118			
	08TB78B	2.360	0.114			
	08TB78C	2.283	0.115			

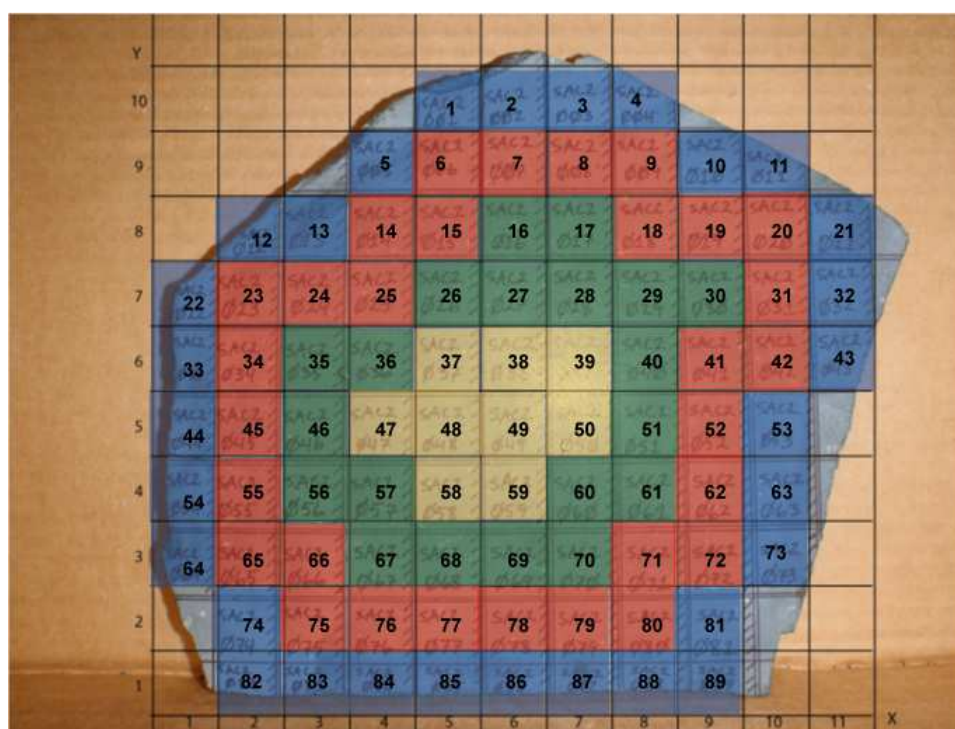


Figure IV- 1: Prisme de Saint-Arcons-d'Allier, les numéros correspondent aux échantillons dont les paramètres d'hystérésis ont été mesurés, les couleurs sont reportées dans la figure 5-27 du chapitre 5.

## Annexe V : Force de fabrique des plagioclases et clinopyroxènes

Coulée de La Palisse

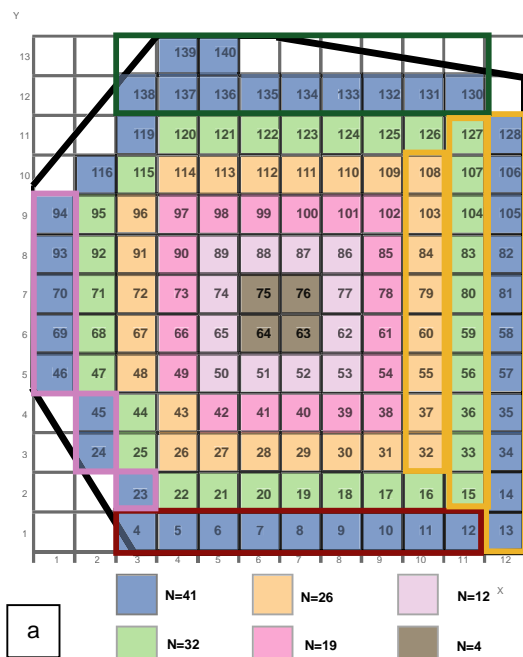
Lieu	Nom Ech	Phase mnl	Nb point	plans ou axes	Max density	E1		E2	E3		J <sub>index</sub>			
Colonnade site 1	07TB02	Plagioclase	250	▶ (100)	3.06	39.22	-25.29	0.48	304.61	-9.65	0.31	195.39	-62.69	0.21
				▶ (010)	5.06	184.35	-58.44	0.57	278.16	-2.34	0.26	9.59	-31.45	0.18
				▶ (001)	2.63	331.65	-30.70	0.42	67.26	-9.36	0.34	172.32	-57.6	0.23
		Pyroxene	250	▶ (100)	3.08	152.79	-34.03	0.43	263.04	-27.14	0.31	22.46	-43.78	0.26
				▶ (010)	2.61	263.87	-49.64	0.38	91.6	-40.1	0.32	358.38	-3.82	0.3
				▶ (001)	2.5	24.77	-33.36	0.42	278.11	-23.03	0.33	160.07	-47.19	0.26
		Magnetite	96	[100]	2.08	145.97	-0.02	0.34	236.1	-79.45	0.33	55.96	-10.55	0.33
				[111]	1.76	145.59	-30.41	0.33	270.32	-44.15	0.33	35.3	-30.57	0.33
				[110]	1.54	308.03	-0.03	0.33	38.13	-73.43	0.33	218.02	-45	0.33
	07TB05	Plagioclase	255	▶ (100)	3.82	46.85	-15.82	0.49	309.87	-23.24	0.32	168.07	-61.34	0.19
				▶ (010)	4.49	200.09	-70.82	0.55	302	-4.11	0.26	33.39	-18.7	0.19
				▶ (001)	2.69	327.69	-4.81	0.41	59.34	-18.96	0.34	224.03	-70.39	0.25
		Pyroxene	252	▶ (100)	3.09	157.53	-58.77	0.41	277.64	-16.91	0.3	15.94	-25.41	0.28
				▶ (010)	2.65	315.2	-43.12	0.38	102.71	-42.01	0.33	208.63	-16.94	0.29
				▶ (001)	2.19	39.31	-0.77	0.41	309.3	-0.28	0.34	199.51	-89.18	0.25
		Magnetite	91	[100]	1.95	280.06	0.00	0.34	10.07	-55.67	0.33	190.06	-34.33	0.33
				[111]	2.09	252.29	-43.12	0.33	112.12	-39.36	0.33	3.58	-21.19	0.33
				[110]	1.83	283	0.00	0.33	193	-64.15	0.33	13	-25.25	0.33
	08TB14b	Plagioclase	274	▶ (100)	3.17	203.1	-0.16	0.47	112.52	-74.41	0.32	293.15	-15.59	0.21
				▶ (010)	4.4	292.45	-6.39	0.56	36.1	-64.6	0.26	199.53	-24.48	0.18
				▶ (001)	2.24	187.38	-86.00	0.42	20.74	-3.89	0.37	290.68	-0.92	0.21
		Pyroxene	241	▶ (100)	2.4	104.34	-8.11	0.41	4.42	-50.42	0.33	200.82	-38.41	0.26
				▶ (010)	2.46	272.07	-52.66	0.4	116	-34.89	0.33	17.74	-11.64	0.27
				▶ (001)	2.46	193.67	-8.29	0.43	55.4	-78.95	0.32	284.73	-7.23	0.25
Magnetite		86	[100]	2.3	90.5	0.00	0.34	180.5	0	0.33	360	-90	0.33	
			[111]	1.63	320.9	-17.82	0.33	128.31	-71.77	0.33	229.71	-3.72	0.33	
			[110]	1.66	319	-0.01	0.33	49.01	-25.76	0.33	228.98	-64.24	0.33	
08TB22b	Plagioclase	251	▶ (100)	2.65	54.62	-41.03	0.47	177.38	-31.87	0.36	290.81	-32.6	0.17	
			▶ (010)	5.92	289.34	-32.23	0.59	168.3	-39.27	0.24	44.64	-34.13	0.17	
			▶ (001)	2.64	23.9	-9.65	0.42	129.53	-57.75	0.36	288.17	-30.44	0.22	
	Pyroxene	250	▶ (100)	2.9	290.87	-20.07	0.4	162.9	-59.3	0.36	29.45	-22.22	0.25	
			▶ (010)	3.01	249.13	-28.17	0.38	345.4	-11.52	0.37	95.35	-59.16	0.25	
			▶ (001)	2.46	56.54	-53.08	0.44	184.14	-24.63	0.33	286.85	-25.63	0.23	
	Magnetite	88	[100]	2.16	339.04	-0.01	0.34	69.04	-9.57	0.33	248.95	-80.43	0.33	
			[111]	1.85	263.79	-10.25	0.33	184.38	-42.12	0.33	4.61	-46.06	0.33	
			[110]	1.64	269.21	-5.51	0.33	167.87	-63.86	0.33	1.84	-25.46	0.33	



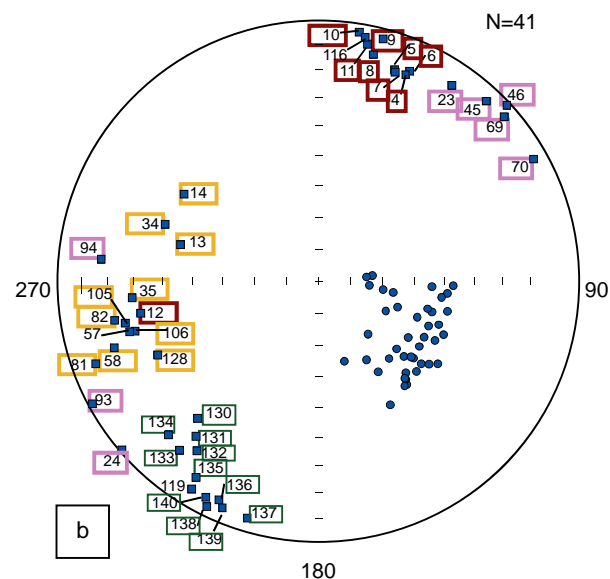
Lieu	Nom Ech	Phase mmf	Nb point	plans ou axes	Max density	E1	E2	E3	J <sub>Index</sub>					
Entablement site 1	08TB32b	Plagioclase	249	(100)	3.02	251.01	-37.12	0.45	140.9	-24.41	0.22			
				(010)	5.07	134.56	-33.05	0.57	233.3	-13.15	0.24	341.9	-53.78	0.18
				(001)	2.89	5.98	-35.94	0.46	251.56	-29.7	0.32	133.17	-39.82	0.22
	Pyroxene		251	(100)	2.02	183.73	-52.88	0.41	285.24	-8.59	0.3	21.49	-35.78	0.3
				(010)	2.15	350.81	-36.62	0.37	254.14	-8.89	0.34	152.61	-51.96	0.3
				(001)	2.37	293.57	-0.40	0.38	23.65	-11.9	0.34	201.65	-78.09	0.29
	Magnetite		87	[100]	2.33	339.04	-0.01	0.34	69.04	-9.57	0.33	248.95	-80.43	0.33
				[111]	2.33	263.79	-10.25	0.33	164.38	-42.12	0.33	4.61	-46.06	0.33
				[110]	2.08	269.21	-5.51	0.33	167.87	-63.86	0.33	1.84	-25.46	0.33
				(100)	4.38	167.87	-51.51	0.55	266.55	-6.84	0.3	1.86	-37.65	0.15
Fausse colonnade (1b) site 2	08TB37	Plagioclase	251	(010)	4.87	7.33	-37.71	0.58	272.5	-6.22	0.28	174.6	-51.6	0.14
				(001)	2.81	266.81	-13.76	0.41	160.76	-48.46	0.34	7.94	-38.24	0.26
				(100)	2.35	279.02	-7.16	0.39	17.96	-51.02	0.37	183.37	-38.07	0.25
	Pyroxene		251	(010)	2.38	349.63	-58.48	0.4	87.11	-4.56	0.35	179.87	-31.11	0.26
				(001)	3.78	179.66	-38.18	0.48	84.7	-6.28	0.28	346.86	-51.12	0.24
				[100]	2	123.00	0	0.34	213.01	-87.35	0.33	33	-2.65	0.33
	Magnetite		89	[111]	1.7	151.88	-36.50	0.33	268.96	-31.59	0.33	27.19	-37.57	0.33
				[110]	1.7	278	0.00	0.33	188	-45	0.33	8	-45	0.33
				(100)	4.42	342.14	-0.19	0.54	72.37	-49.85	0.24	251.98	-40.15	0.22
				(010)	4.06	245.39	-46.62	0.53	79.11	-42.55	0.31	342.74	-6.89	0.16
Fausse colonnade (2) site 2	08TB58b	Pyroxene	251	(001)	2.54	33.84	-41.82	0.42	129.46	-6.25	0.35	226.32	-47.5	0.23
				(100)	2.6	257.81	-32.70	0.45	99.01	-55.45	0.33	354.27	-9.94	0.22
				(010)	2.76	79.96	-36.70	0.4	294.08	-48.01	0.33	183.56	-17.51	0.28
	Pyroxene		251	(001)	3.21	174.28	-0.61	0.47	81.3	-78.46	0.29	264.41	-11.53	0.24
				[100]	2.44	218.85	0.00	0.34	308.85	0	0.33	360	-90	0.33
				[111]	1.81	154.37	-37.90	0.33	269.82	-28.89	0.33	25.95	-38.6	0.33
	Magnetite		90	[110]	1.65	206.25	-40.27	0.33	83.75	-32.39	0.33	329.51	-32.92	0.33
				(100)	3.23	163.9	-22.40	0.5	254.7	-1.9	0.3	349.2	-67.5	0.2
				(010)	3.61	348.6	-70.50	0.5	246.5	-4.3	0.3	155	-18.9	0.2
				(001)	2.4	136	-7.90	0.4	227	-7.2	0.3	358.9	-79.3	0.3
Fausse colonnade (2) site 2	08tb70b	Pyroxene	251	(100)	2.42	338.8	-85.20	0.5	231.8	-1.4	0.3	141.7	-4.6	0.3
				(010)	2.26	53.9	-20.50	0.4	315.7	-20.9	0.3	184.2	-59.9	0.3
				(001)	2.29	135.8	-10.40	0.4	228.8	-15.7	0.3	13.6	-71	0.2
	Pyroxene		255	[100]	1.97	129.4	0.00	0.3	219.4	0	0.3	360	-90	0.3
				[111]	1.88	251.9	-61.70	0.3	97.3	-25.9	0.3	2.1	-10.6	0.3
				[110]	1.64	289	0.00	0.3	199	-45	0.3	19	-45	0.3
	Magnetite		86	(100)	3.63	265.59	-37.89	0.47	170.88	-6.03	0.34	73.25	-51.46	0.18
				(010)	4.81	87.07	-50.83	0.59	314.54	-28.84	0.23	210.31	-24.06	0.18
				(001)	2.96	355.15	-13.38	0.46	255.38	-35.5	0.33	102.43	-51.31	0.21
				(100)	2.64	67.72	-46.28	0.41	184.72	-23.46	0.3	292	-34.39	0.29
Fausse colonnade (2) site 2	08TB71	Pyroxene	255	(010)	2.1	117.83	-49.30	0.38	300.94	-40.66	0.33	209.62	-1.53	0.29
				(001)	2.77	233.72	-31.72	0.41	333.07	-14.72	0.35	84.48	-54.25	0.23
				[100]	2.03	206	0.00	0.34	115.99	-88.83	0.33	296	-1.17	0.33
	Magnetite		86	[111]	1.9	182	-17.86	0.33	319.26	-66.32	0.33	87.04	-15.04	0.33
				[110]	1.62	219.35	-25.44	0.33	90.91	-52.57	0.33	322.44	-25.46	0.33
				(100)	3.63	265.59	-37.89	0.47	170.88	-6.03	0.34	73.25	-51.46	0.18
				(010)	4.81	87.07	-50.83	0.59	314.54	-28.84	0.23	210.31	-24.06	0.18
	Magnetite		86	(001)	2.96	355.15	-13.38	0.46	255.38	-35.5	0.33	102.43	-51.31	0.21
				(100)	2.64	67.72	-46.28	0.41	184.72	-23.46	0.3	292	-34.39	0.29
				(010)	2.1	117.83	-49.30	0.38	300.94	-40.66	0.33	209.62	-1.53	0.29
(001)				2.77	233.72	-31.72	0.41	333.07	-14.72	0.35	84.48	-54.25	0.23	

Coulée de La Palisse														
Lieu	Nom Ech	Phase mmf	Nb point	plans ou axes	Max density	E1			E2			E3	J <sub>Index</sub>	
Fausse colonnade (1a) site 2	Plagioclase	250	250	[100]	4.85	14.58	-53.48	0.53	147.18	-26.63	0.3	249.5	-23.05	0.17
						247.94	-27.23	0.62	134.28	-37.95	0.24	3.48	-39.95	0.14
						155.61	-2.25	0.44	61.51	-61.21	0.35	246.84	-28.68	0.21
	Pyroxene	253	253	[100]	2.75	253.96	-15.51	0.42	148.79	-43.33	0.33	358.73	-42.57	0.25
						171.63	-15.38	0.38	264.66	-10.88	0.34	28.59	-71.01	0.29
						8.14	-54.14	0.43	144.53	-27.63	0.32	246.11	-20.98	0.25
Magnetite	90	90	[100]	1.95	24.09	-38.47	0.33	265.77	-30.84	0.33	149.77	-36.88	0.33	
					138.12	-15.48	0.33	271.48	-68.04	0.33	43.8	-15.19	0.33	
					210.08	-84.72	0.33	356.65	-4.41	0.33	86.88	-2.9	0.33	
Colonnade site 2	Plagioclase	250	250	[100]	3.34	167.22	-8.19	0.46	65.06	-55.64	0.37	262.6	-33.1	0.17
						263.92	-32.36	0.62	56	-54.36	0.21	165.29	-13.33	0.17
						51.78	-53.53	0.46	163.87	-13.96	0.35	262.04	-29.73	0.19
	Pyroxene	250	250	[100]	2.57	231.29	-29.52	0.42	124.82	-26.59	0.32	0.7	-48.26	0.26
						276.32	-22.37	0.4	93.57	-67.61	0.31	185.92	-0.97	0.28
						21.9	-56.84	0.4	158.11	-25.26	0.38	258.01	-20.02	0.22
Magnetite	95	95	[100]	2.49	107	0.00	0.34	197	-0.03	0.33	16.91	-89.97	0.33	
					320.36	-25.69	0.33	91.04	-53.57	0.33	218.03	-23.94	0.33	
					251.99	0.00	0.33	161.98	-71.55	0.33	341.99	-18.45	0.33	
Zone à débit planaire	Plagioclase	250	250	[100]	3.37	2.23	2.1		95.5	57.23		270.88	32.68	
						268.15	39.18		74.88	50.06		172.77	6.56	
						73.99	49.46		171.19	6.19		266.33	39.88	
	Pyroxene	250	250	[100]	3.38	272.65	26.2		88.54	63.74		181.85	1.63	
						27.71	51.80		271.2	19.35		168.78	31.47	
						172.56	25.07		54.65	45.02		281.28	34.46	
Magnetite	95	95	[100]	2.06	298.44	42.67		144.53	44.26		41.11	13.39		
					220.39	81.14		83.63	6.48		352.94	6.02		
					207.03	34.11		55.36	52.42		306.65	13.87		

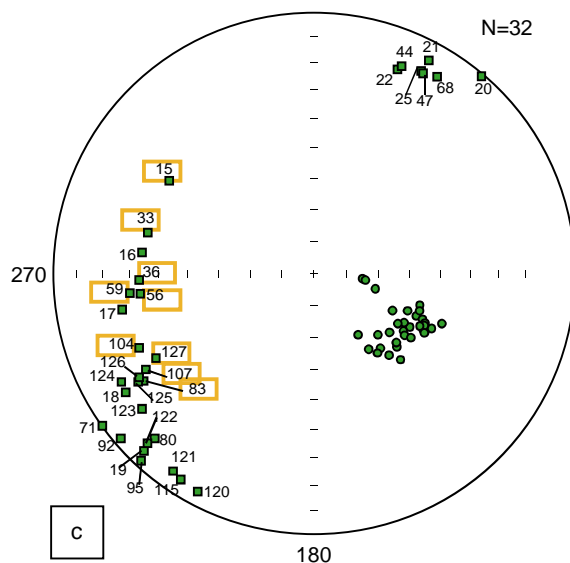
## Annexe VI : Orientations des axes de susceptibilité magnétique du prisme de La Palisse



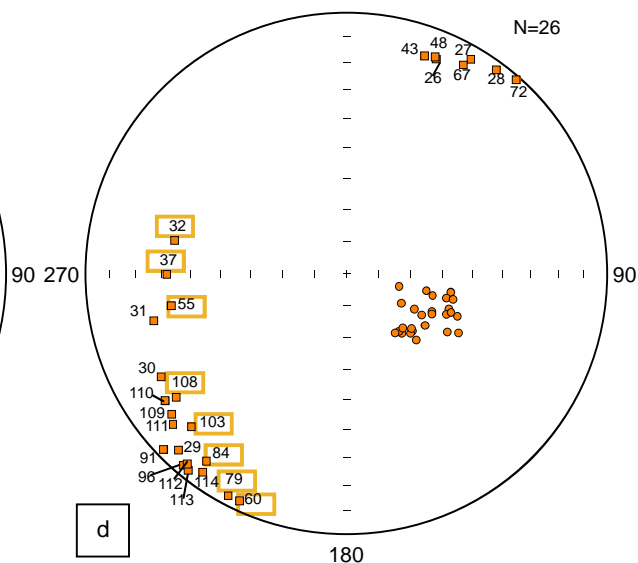
Prisme issu de la colonnade de la coulée de La Palisse (site 1). N correspond au nombre d'échantillon mesurés. Les numéros des échantillons sont indiqués sur la figure. Les couleurs correspondant à l'emplacement des échantillons dans le prisme sont reportées dans les stéréogrammes pour les axes  $k_1$  sont projetés.



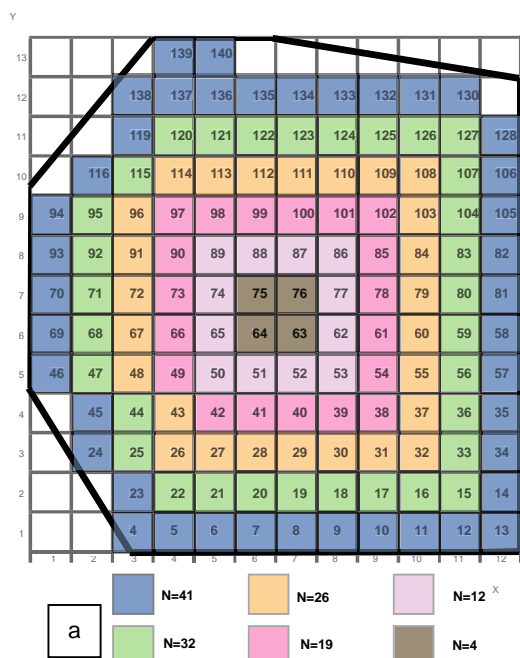
Projection des axes  $k_1$  et  $k_3$  des échantillons issus du bord du prisme (bleu) de La Palisse. Les numéros correspondent aux ceux des échantillons de la figure a.



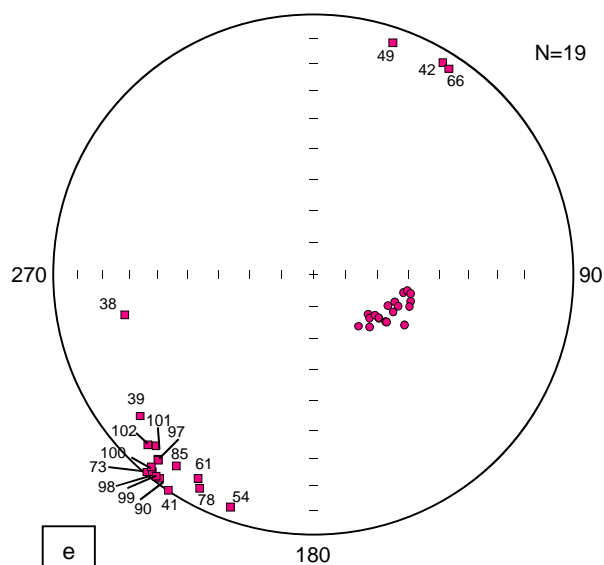
Projection des axes  $k_1$  et  $k_3$  des échantillons issus du bord du prisme (vert) de La Palisse. Les numéros correspondent aux ceux des échantillons de la figure a.



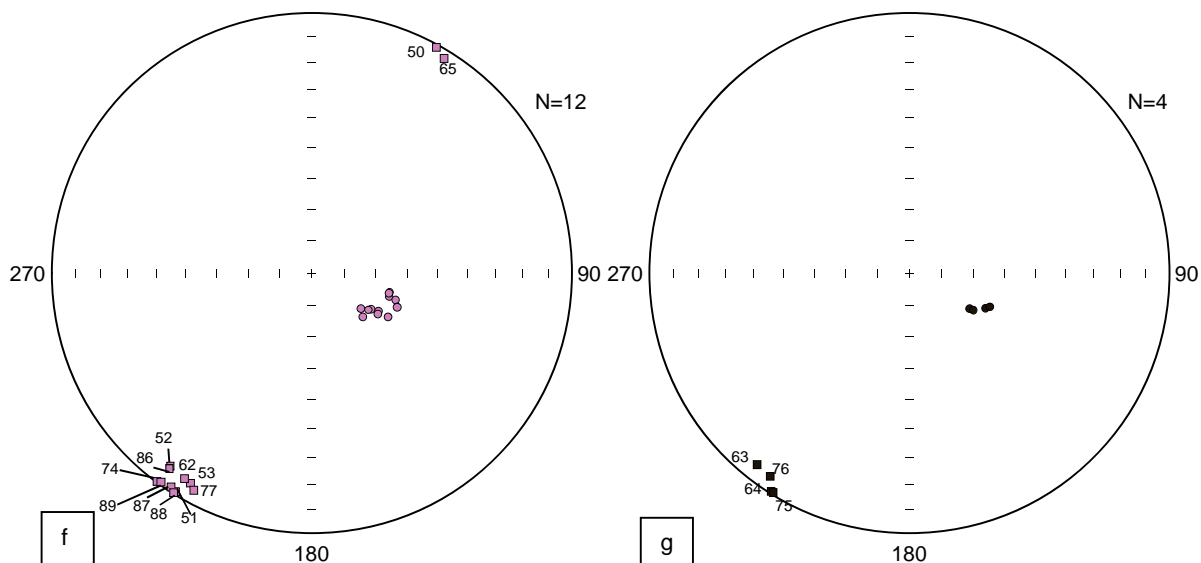
Projection des axes  $k_1$  et  $k_3$  des échantillons issus du prisme (orange) de La Palisse. Les numéros correspondent aux ceux des échantillons de la figure a.



Prisme issu de la colonnade de la coulée de La Palisse (site 1). N correspond au nombre d'échantillon mesurés. Les numéros des échantillons sont indiqués sur la figure. Les couleurs correspondant à l'emplacement des échantillons dans le prisme sont reportées dans les stéréogrammes pour les axes  $k_1$  sont projetés.



Projection des axes  $k_1$  et  $k_3$  des échantillons issus du bord du prisme (rose) de La Palisse. Les numéros correspondent aux ceux des échantillons de la figure a.



Projection des axes  $k_1$  et  $k_3$  des échantillons issus du bord du prisme (parme) de La Palisse. Les numéros correspondent aux ceux des échantillons de la figure a.

Projection des axes  $k_1$  et  $k_3$  des échantillons issus du bord du prisme (gris) de La Palisse. Les numéros correspondent aux ceux des échantillons de la figure a.





NNT : 2011 EMSE 0622

Tiphaine BOIRON

Multi-scale study of structural, geochemical and magnetic properties variations in columnar basalt flows: example of the La Palisse (Ardèche) and Saint-Arcons-d'Allier (Haute-Loire) basalt flows.

Speciality : Earth sciences

**Keywords :** Basalt, columnar jointing, lava flow, magnetic properties, structure, geochemistry, French Massif Central.

**Abstract :**

Columnar jointing is frequently observed in lava flows, as in the Giant Causeway (Ireland). The most common theory explaining the formation of prisms is by the thermal contraction. However, this theory hardly explains some field observations such as the frequent existence of three parts within the lavas flows, from the base to the top.

To complete our understanding of the structuring lava flows, we carried out a multidisciplinary study based on the magnetic properties, structural and geochemical characterization of two basaltic flows from the French Massif Central (La Palisse, Ardèche and Saint-Arcons-d'Allier, Haute-Loire). Our approach shows that crystallographic and magnetic fabrics are governed by the flow. The distribution of titanomagnetite grains carrying the magnetic fabrics is mainly controlled by the plagioclase orientation. Our study also shows that the use of the AMS to determine the flow direction is a reliable tool, provided punctual control by measurements of crystallographic fabrics are performed. Measurements of the water content and isotopic analyses (H and O) show a limited weathering effect in the studied areas: rock water is mostly primary water in equilibrium with the magma. Moreover, second order changes are noted across the prism section such as hysteresis parameters associated to grain size variation of titanomagnetite (larger grains in the center). The variations of magnetic properties across the prism section suggest a gradient of the crystallization rate from the center to the edge of the prism, which seems difficult to reconcile with the structuring of the flow by thermal contraction only.



École Nationale Supérieure des Mines  
de Saint-Étienne

NNT : 2011 EMSE 0622

Tiphaine BOIRON

Étude multi-échelle des variations structurales, géochimiques et des propriétés magnétiques des coulées basaltiques prismées : exemple de la coulée de La Palisse (Ardèche) et de Saint-Arcons-d'Allier (Haute-Loire)

Spécialité: Sciences de la terre

Mots clefs : Basalte, prismation, coulée de lave, propriétés magnétiques, structures, géochimie, Massif central, France.

Résumé :

Des structures prismées sont fréquemment observées dans les coulées de lave comme la Chaussée des Géants (Irlande). Plusieurs théories existent pour expliquer ces formations, dont la plus répandue est celle de la contraction thermique. Or cette théorie permet difficilement de comprendre certaines observations de terrain comme la séparation fréquente des coulées en plusieurs niveaux.

Afin de mieux comprendre la structuration au sein des coulées basaltiques, nous avons procédé à une étude pluridisciplinaire basée sur les propriétés magnétiques, les variations structurales et géochimiques de deux coulées prismées du Massif Central (La Palisse, Ardèche et Saint-Arcons-d'Allier, Haute-Loire). Notre approche permet de montrer que les fabriques cristallographiques et magnétiques sont gouvernées par l'écoulement de la lave. L'orientation du plagioclase contrôle la distribution des titanomagnétites à l'origine des fabriques magnétiques. Notre étude montre également que l'utilisation de l'ASM est un outil fiable pour déterminer l'orientation de l'écoulement à condition d'être contrôlée par des mesures de fabriques cristallographiques. Les mesures de la quantité d'eau et les analyses isotopiques (H et O) montrent que l'effet de l'altération météorique est faible et que l'eau contenue dans la roche est essentiellement de l'eau de constitution. De plus, à l'échelle du prisme, des variations de deuxième ordre sont observées comme celle des paramètres d'hystérésis qui indique des tailles de grains de titanomagnétites plus importantes vers le centre. Ces variations au sein du prisme semblent difficilement compatibles avec une structuration des coulées par la simple contraction thermique.